

**DISEÑO, CONSTRUCCIÓN, INSTALACIÓN Y PUESTA A PUNTO DE UN  
SISTEMA DE ENFRIAMIENTO PARA EL CIRCUITO TÉRMICO DE LOS  
INTERCAMBIADORES DE CALOR (CORAZA-TUBOS Y TUBOS  
CONCÉNTRICOS) DEL LABORATORIO DE TERMOFLUIDOS**

Yasmin Piracun Rodríguez

Andrés Ortiz Ortiz

Oscar Javier Ruiz Bermúdez

Proyecto de Grado

Asesor: Ing. M.Sc. Manuel Alejandro Mayorga

Escuela Colombiana de Carreras Industriales  
Facultad de Ingeniería  
Coordinación de Mecánica  
Bogotá D.C  
2015

**DISEÑO, CONSTRUCCIÓN, INSTALACIÓN Y PUESTA A PUNTO DE UN  
SISTEMA DE ENFRIAMIENTO PARA EL CIRCUITO TÉRMICO DE LOS  
INTERCAMBIADORES DE CALOR (CORAZA-TUBOS Y TUBOS  
CONCÉNTRICOS) DEL LABORATORIO DE TERMOFLUIDOS**

Yasmin Piracun Rodríguez

Andrés Ortiz Ortiz

Oscar Javier Ruiz Bermúdez

Escuela Colombiana de Carreras Industriales  
Facultad de Ingeniería  
Coordinación de Mecánica  
Bogotá D.C  
2015

Nota de Aceptación

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

Firma del presidente del Jurado

---

Firma del Jurado

---

Firma del Jurado

Bogotá 28 Abril 2015

Ing. Fernando Soler López  
Rector

Ing. Hugo Soler López  
Vicerrector Académico

Ing. Luisa Hincapié  
Secretario General

Ing. Mauricio Veloza  
Decano de Ingeniería

Ing. Carlos Alberto Cristancho R.  
Coordinador de Mecánica



## **DEDICATORIA**

Dedico este proyecto de grado primordialmente a Dios por darme la oportunidad de vivir esta experiencia, a mi familia que me han apoyado y formado con buenos valores ayudándome a crecer como persona, a mis compañeros que conocí durante el proceso de aprendizaje de Ingeniería Mecánica por aportarme conocimiento, una bonita amistad y crecimiento profesional.

**Yasmin Piracun Rodríguez**

Dedico este proyecto de grado a mi familia por brindarme apoyo intelectual, moral y por el esfuerzo que han realizado para poderme educar a pesar de las dificultades que hemos vivido, a mis compañeros de estudio y de proyecto que con su amistad vivimos momentos inolvidables y me han hecho crecer profesional y socialmente.

**Oscar Javier Ruiz Bermúdez**

Son varias las personas a las cuales les debo lo que soy como persona y profesional. Doy gracias a Dios por haberme dado vida y salud para poder cumplir con constancia y disciplina esta meta. A mi familia, por ser el motor de mi vida, por el apoyo, consejos y los valores enseñados; pero sin ninguna duda por el amor. A mi linda madre por el apoyo, la confianza, el cariño y amor que me has brindado a lo largo de mi vida y más aún, durante el desarrollo de mi carrera. A mí querido padre por el ejemplo y respeto que lo caracteriza, por la lucha diaria a la cual se enfrenta diariamente por su familia y por la tenacidad que le herede. A mis hermanos Daniela y Samuel, por su confianza, apoyo, complicidad y amor; espero ser un ejemplo a seguir para los dos. Al ingeniero Manuel Alejandro Mayorga, tutor de este proyecto; por creer en nuestro proyecto, asesorarnos, guiarnos e impulsar la investigación como parte fundamental del desarrollo profesional. Al Ingeniero Carlos Navarro por su gran apoyo logístico y colaboración en la obtención de permisos para el desarrollo práctico de la tesis. Al Ingeniero José David Barón por su apoyo constante en la interlocución de dudas y la enseñanza para llevar a buen término las pruebas de la caldera pirotubular ECCL 3. A mis compañeros de tesis y amigos de la vida, Yasmin y Oscar por llevar este sueño adelante, por sacrificar momentos valiosos con sus familias para llevar a buen término esta tesis. Por su bondad y buena energía para superar los problemas que se presentaron. Siempre sostendré que la perseverancia y responsabilidad, además de todos los aportes nos fortalecieron como un excelente equipo de trabajo y amigos de la vida. Me remito a las palabras del gran cantante “Gracias totales”

**Andrés Ortiz Ortiz**

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradecemos a los profesores que intervinieron e hicieron parte de nuestro aprendizaje de Ingeniería mecánica, especialmente a Ing. M. Sc. Manuel Alejandro Mayorga por su guía y apoyo en el desarrollo del proyecto, al personal de los talleres de la universidad por su colaboración y ayuda al momento de la instalación y puesta a punto del sistema.

También agradecemos a las personal que directamente e indirectamente nos han orientado y colaborado con sus servicios, a los compañeros que han puesto su granito de arena para lograr acoplar los elementos y formar la planta ECCI 3.

## TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN .....	4
OBJETIVOS.....	5
OBJETIVO GENERAL .....	5
OBJETIVO ESPECÍFICO .....	5
1.GENERALIDADES DE LOS SISTEMAS DE ENFRIAMIENTO Y REFRIGERACIÓN .....	6
1.1. Clasificación de los sistemas de enfriamiento y refrigeración .....	6
1.1.1.Sistema de refrigeración por Aire.....	6
1.1.2.Sistema de refrigeración por Líquido .....	7
1.1.3.Componentes del sistema.....	9
1.2. Aire Acondicionado .....	10
1.2.1.Componentes Básicos .....	11
1.2.1.1. Refrigerantes .....	11
1.2.1.2. Compresor .....	11
1.2.1.3. Condensador .....	11
1.2.1.4. Válvula de expansión .....	11
1.2.1.5. Evaporador .....	12
1.2.2.Refrigerantes Comunes .....	12
1.2.3.Aplicaciones.....	12
1.3. Torres de Enfriamiento .....	12
1.3.1.Funcionamiento .....	13
1.3.2.Eficiencia y rendimiento .....	13
1.3.3.Aplicaciones.....	13
1.4. Radiadores.....	13
1.4.1.Componentes principales.....	14
1.4.2.Tipos de radiadores .....	15
1.4.2.1. Radiadores Tubulares.....	15
1.4.2.2. Radiadores con tubo de aire .....	15
1.4.2.3. Radiadores nido de abeja .....	16
1.4.2.4. Radiadores de circulación descendente .....	16
1.4.2.5. Radiadores de circulación transversal .....	17
1.5. Tubos con Aletas .....	17
1.5.1.Materiales de fabricación de las aletas .....	18
1.5.2.Eficiencia de la aleta .....	18
1.5.3.Efectividad de la aleta .....	18
1.5.4.Aplicaciones.....	19
1.6. Enfriador de Agua (Water Chiller) .....	19
1.6.1.Componentes Básicos y secundarios .....	20

1.6.1.1. Compresor .....	20
1.6.1.2. Condensador .....	20
1.6.1.3. Válvula de expansión .....	20
1.6.1.4. Evaporador .....	20
1.6.1.5. Elementos Secundarios .....	20
1.6.2.Refrigerantes Comunes .....	21
1.6.3.Aplicaciones.....	21
2.ANTECEDENTES DEL FUNCIONAMIENTO DE INTERCAMBIADORES DE CALOR (CORAZA-TUBOS Y TUBOS CONCÉNTRICOS) DEL LABORATORIO DE TERMOFLUIDOS .....	22
2.1. Levantamiento de plano de la planta ECCI 3.....	22
2.2. Toma de datos y estado de la caldera .....	23
2.2.1.Primer toma de datos.....	23
2.2.2.Segunda toma de datos .....	24
2.2.3.Tercera toma de datos.....	25
3.CÁLCULO DE EQUIPOS DE REFRIGERACIÓN .....	26
3.1. Cálculo de enfriador de agua (Chiller Water) .....	26
3.1.1.Proceso para cálculos termodinámicos de refrigerante .....	28
3.1.2.Ciclo termodinámico para refrigerante R-134a .....	29
3.1.3.Calor del evaporador y condensador, trabajo del compresor y coeficiente de rendimiento .....	32
3.1.4.Cálculo de Flujo de calor del agua caliente, flujo másico del refrigerante y potencia del compresor.....	33
3.2. Cálculo de Tubos con aletas.....	34
3.2.1.Cálculos de tubo aleteado.....	34
3.2.2.Calculo de coeficiente de convección forzada: .....	39
3.2.3.Calculo de coeficiente de convección natural .....	40
3.2.4.Calculo de la convección natural y forzada combinada .....	41
3.2.5.Calculo de tubo aletado con coeficiente combinado .....	41
3.3. Cálculo de Radiador .....	45
3.3.1.Parámetros del diseño de radiador: .....	45
3.3.2.Cálculo del área del radiador .....	47
3.3.3.Calculo de densidad del líquido .....	49
3.3.4.Diámetro hidráulico de la aleta.....	51
3.3.4.1. Calculo de número de Reynolds para el aire .....	52
3.3.5.Diámetro hidráulico del tubo .....	52
3.3.5.1. Calculo de número de Reynolds para el agua .....	53
3.3.6.Calculo del coeficiente global de transferencia de calor .....	55
3.3.7.Dimensiones del radiador .....	59
4.SELECCIÓN DEL EQUIPO DE REFIGERACIÓN .....	63
4.1. Selección del sistema .....	63

5.UBICACIÓN Y PUESTA A PUNTO DEL EQUIPO DE REFRIGERACIÓ .....	66
5.1. Cálculos de pérdidas .....	67
5.2. Instalación y puesta a punto del sistema de enfriamiento .....	67
5.3. Instalación eléctrica .....	68
5.3.1.Tablero de mando .....	71
5.4. Evaluación y prueba del sistema eléctrico e hidráulico .....	72
5.4.1.Primer prueba: .....	72
5.4.2.Segunda prueba .....	73
6.COMPARACIÓN DE FUNCIONAMIENTO CON EL EQUIPO NUEVO .....	76
6.1. Intercambiador coraza tubos antes- después .....	76
6.2. Intercambiador doble tubo .....	78
7.MANUAL DE OPERACIÓN.....	80
7.1. EQUIPOS A UTILIZAR .....	80
7.2. ESQUEMA DE LOS INTERCAMBIADORES.....	80
7.2.1.Componentes de los intercambiadores.....	81
7.2.1.1. Tubos concéntricos .....	81
7.2.1.2. Tubos con coraza .....	82
7.2.1.3. Radiador .....	82
7.2.1.4. Caldera .....	83
7.3. PROCEDIMIENTO DE OPERACIÓN .....	84
7.3.1.Puesta en marcha de la caldera .....	84
7.3.2.Puesta en marcha de los intercambiadores .....	89
7.3.3.Tipo de operación .....	91
7.4. FINALIZACIÓN DEL PROCESO Y APAGADO DEL SISTEMA.....	100
7.5. MANTENIMIENTO DEL EQUIPO DE TRANSFERENCIA DE CALOR (INTERCAMBIADORES) .....	101
7.5.1.Depósito línea fría.....	101
7.5.2.Deposito condensados .....	101
8.GUIA DE LABORATORIO PLANTA CALDERA PIROTUBULAR ECCI 3, INTERCAMBIADORES DE CALOR Y SUPERFICIE EXTENDIDA RADIADOR .	102
8.1. Objetivos:.....	102
8.2. Conceptos básicos:.....	102
8.2.1.Calderas.....	102
8.2.2.Intercambiadores de calor.....	104
8.3. Practica de laboratorio .....	107
8.3.1.Grafica de valores .....	109
8.3.2.Practica en el radiador .....	109
8.3.3.Cuestionario .....	112
CONCLUSIONES .....	113
RECOMENDACIONES .....	115
REFERENCIA.....	116
ANEXOS .....	118

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Toma de datos de agua de refrigeración intercambiador tubos con coraza .....	24
Tabla 2. Toma de datos intercambiador coraza - tubos.....	25
Tabla 3. Cálculo de las variables K e I.....	38
Tabla 4. Propiedades del aire .....	39
Tabla 5. Propiedades del aire a temperatura de película.....	40
Tabla 6. Calculo de las variables K e I con coeficiente combinado.....	43
Tabla 7. Propiedades físicas del agua líquida.....	46
Tabla 8. Propiedades físicas del aire seco .....	47
Tabla 9. Propiedades térmicas de materiales de construcción y aislantes .....	51
Tabla 10. Valores representativos de los coeficientes totales de transferencia de calor en los intercambiadores de calor. ....	57
Tabla 11. Selección del sistema .....	64
Tabla 12. Datos de temperatura del fluido de refrigeración intercambiador tubos-coraza .....	74
Tabla 13. Datos de temperatura del fluido de refrigeración intercambiador tubos concéntricos.....	74
Tabla 14. Datos de temperatura de fluido refrigeración en el radiador .....	75
Tabla 15. Comparación de temperaturas en la entrada y salida del fluido refrigerante intercambiador coraza tubo .....	76
Tabla 16. Comparación de temperaturas de flujo de refrigeración en el intercambiador tubos concéntricos .....	78
Tabla 17. Toma de datos para práctica .....	108
Tabla 18. Propiedades del agua líquida a presión atmosférica .....	110
Tabla 19. Propiedades del aire seco a presión atmosférica .....	111

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Aletas.....	7
Figura 2. Refrigeración por aire .....	7
Figura 3. Sistema de refrigeración por agua.....	8
Figura 4. Termostato y su ciclo .....	8
Figura 5. Radiador .....	9
Figura 6. Ventilador.....	9
Figura 7. Bomba de agua .....	10
Figura 8. Depósito de agua.....	10
Figura 9. Variedad de equipos para aire acondicionado.....	11
Figura 10. Torre de enfriamiento.....	13
Figura 11. Partes del radiador.....	14
Figura 12. Radiador tubular .....	15
Figura 13. Radiadores con tubo de aire.....	16
Figura 14. Radiadores nido de abeja .....	16
Figura 15. Radiador de circulación descendente .....	17
Figura 16. Radiador de circulación transversal .....	17
Figura 17. Tubos aletados .....	18
Figura 18. Chiller industrial .....	19
Figura 19. Diagrama de flujo del proceso actual.....	23
Figura 20. Termómetro de entrada vapor .....	24
Figura 21. Purga de tanque de agua .....	25
Figura 22. Ciclo termodinámico de chiller .....	27
Figura 23. Diagrama termodinámico T-S y P-H .....	27
Figura 24. Eficiencia de aletas circulares de espesor constante t.....	35
Figura 25. Eficiencia del tubo aletado .....	37
Figura 26. Eficiencia del tubo aletado con coeficiente combinado.....	43
Figura 27. Radiador de vehículo Ford.....	47
Figura 28. Dimensiones del tubo del radiador .....	48
Figura 29. Dimensiones de las aletas .....	48
Figura 30. Aletas de forma triangular.....	48
Figura 31. Número de Nusselt y factor de fricción para flujo laminar.....	50
Figura 32. Geometría del tubo .....	53
Figura 33. Panel del radiador.....	53
Figura 34. Cálculo para la media logarítmica en el radiador .....	58
Figura 35. Flujo cruzado de un solo pasó con los dos fluidos de flujo no mezclados .....	59
Figura 36. Flujo cruzado con los fluidos no mezclados.....	61
Figura 37. Sistema de refrigeración radiador .....	66
Figura 38. Base de radiador.....	67

Figura 39. Acoplamiento de tubería .....	68
Figura 40. Termostato 1 .....	68
Figura 41. Posición de flotador 1 .....	69
Figura 42. Mantenimiento de tanque de almacenamiento de refrigerante .....	70
Figura 43. Termostato 2 .....	70
Figura 44. Instalación de flotador tanque de condensados .....	71
Figura 45. Conexiones de los elementos eléctricos .....	71
Figura 46. Tablero de mando .....	72
Figura 47. Prueba hidráulica paso del flujo refrigerante por el radiador .....	73
Figura 48. Prueba de funcionamiento parte eléctrica .....	74
Figura 49. Comparación de temperaturas de flujo de enfriamiento a la entrada del intercambiador coraza-tubos .....	77
Figura 50. Comparación del flujo de enfriamiento a la salida del intercambiador coraza-tubos .....	77
Figura 51. Comportamiento del flujo refrigerante a la entrada del intercambiador tubos concéntricos .....	78
Figura 52. Comportamiento de flujo refrigerante a la salida del intercambiador tubos concéntricos .....	79
Figura 53. Esquema de los intercambiadores de calor .....	81
Figura 54. Componentes intercambiador de tubos concéntricos .....	81
Figura 55. Componentes intercambiador de tubos con coraza .....	82
Figura 56. Elementos del radiador .....	83
Figura 57. Componentes de la caldera .....	83
Figura 58. Válvula entrada de agua al depósito .....	84
Figura 59. Nivel de agua de la caldera .....	85
Figura 60. Válvula desagüe caldera .....	85
Figura 61. Distribuidor de vapor caldera .....	86
Figura 62. Válvula pasó de agua a la caldera .....	86
Figura 63. Tablero eléctrico accionamiento bomba de agua .....	87
Figura 64. Perilla del quemador de la caldera .....	87
Figura 65. Válvula cilindro .....	87
Figura 66. Tablero eléctrico accionamiento quemador .....	88
Figura 67. Quemador encendido .....	88
Figura 68. Manómetro de presión caldera .....	88
Figura 69. Termómetro de caldera .....	89
Figura 70. Nivel de agua depósito y válvula 7 .....	89
Figura 71. Válvula 8 y 9 .....	90
Figura 72. Conexión de clavija a toma corriente 110V .....	90
Figura 73. Tablero energizado para control automático de bombas .....	90
Figura 74. Posición de perillas para energizar sistemas de bombeo y ventilación .....	91
Figura 75. Válvula 10 conexión intercambiador tubos con coraza y concéntricos .....	92
Figura 76. Válvulas 11 y 12 .....	92
Figura 77. Distribuidor de vapor caldera .....	92
Figura 78. Manómetro presión caldera .....	93
Figura 79. Termostato 1 .....	93



Figura 80. Testigo verde activo indicando que la bomba 1 esta prendida .....	94
Figura 81. Sensor de nivel de agua que activa bomba 1 .....	94
Figura 82. Válvula 13 .....	95
Figura 83. Verificación de testigos de ventiladores encendidos .....	95
Figura 84. Termostato 2.....	96
Figura 85. Válvula 10 conexión intercambiador tubos con coraza y concéntricos .	96
Figura 86. Válvula 11 y 12 .....	96
Figura 87. Distribuidor de vapor.....	97
Figura 88. Válvula 5 en el distribuidor de calor .....	97
Figura 89. Termostato 1.....	98
Figura 90. Testigo verde activo indicando que la bomba esta prendida .....	98
Figura 91. Sensor de nivel de agua que activa la bomba 1 .....	98
Figura 92. Válvula 13 .....	99
Figura 93. Verificación de testigos de ventiladores encendidos .....	99
Figura 94. Termostato 2.....	100
Figura 95. Válvulas 14 y 15 .....	100
Figura 96. Válvula de drenaje 16 .....	101
Figura 97. Tipos de calderas.....	102
Figura 98. Partes de caldera pirotubular horizontal .....	103
Figura 99. Sistema de intercambiadores de calor en el laboratorio de termofluidos .....	104
Figura 100. Clasificación de equipos de transferencia de calor .....	105
Figura 101. Intercambiador de calor tubos concéntricos .....	105
Figura 102. Intercambiador de calor tubos con coraza 1-2.....	106
Figura 103. Intercambiador de calor tubos con coraza 1-4.....	106
Figura 104. Partes principales de intercambiador de calor tubos con coraza .....	107
Figura 105. Problema de gas de combustión.....	115

## LISTA DE ANEXOS

Anexo 1. Tabla de valores de calor específico del agua .....	118
Anexo 2. Tabla de valores para densidad del agua .....	119
Anexo 3. Tabla termodinámica de propiedades saturadas refrigerante R-407C para 10°C.....	120
Anexo 4. Tabla termodinámica propiedades saturadas refrigerante R-407C para 73°C y 74°C .....	121
Anexo 5. Tablas termodinámicas vapor sobrecalentado refrigerante R-407 a 3600°C y 3800°C .....	122
Anexo 6. Tabla termodinámica propiedades saturadas refrigerante R-422 <sup>a</sup> para 15°C, 59°C y 60°C .....	123
Anexo 7. Tabla termodinámica vapor sobrecalentado refrigerante R-422A a 2800Kpa y 3000Kpa .....	124
Anexo 8. Tabla termodinámica propiedades saturadas refrigerante R-22 para 5°C .....	125
Anexo 9. Tabla termodinámica propiedades saturadas refrigerante R-22 para 93°C y 94°C .....	126
Anexo 10. Tabla termodinámica vapor sobrecalentado refrigerante R-22 a 4700Kpa y 4800Kpa .....	127
Anexo 11. Tabla de propiedades saturadas para refrigerante R134a a 15°C.....	128
Anexo 12. Tabla propiedades saturadas para refrigerante R134a a 90°C y 91°C .....	129
Anexo 13. Tablas de propiedades de vapor sobrecalentado refrigerante R-143a a 3200Kpa .....	130
Anexo 14. Tablas termodinámicas para vapor sobrecalentado refrigerante R-134a a 3400Kpa .....	131
Anexo 15. Cálculos termodinámicos para refrigerante R-143a.....	132
Anexo 16. Cálculos termodinámicos para refrigerante R-407C .....	132
Anexo 17. Cálculos termodinámicos refrigerante R-422A .....	133
Anexo 18. Cálculos termodinámicos refrigerante R-22.....	133
Anexo 19. Tabla de valores típicos para el coeficiente de transferencia de calor por convección.....	134
Anexo 20. Eficiencia y áreas de superficies de configuración comunes de aletas .....	135
Anexo 21. Tabla de propiedades del aire a 1 atm.....	136
Anexo 22. Regímenes de convección natural, forzada, mezclada para flujos en tubos horizontales.....	137
Anexo 23. Cálculos termodinámico intercambiador de calor (radiador).....	138

Anexo 24. Lay-out de la caldera piro tubular miniatura ECCI 3 e intercambiadores de calor actual.....	139
Anexo 25. Propuesta 1.ubicacion de radiador para refrigeración de agua intercambiadores de calor actual .....	140
Anexo 26. Propuesta 2. Ubicación de radiador para refrigeración de agua de los intercambiadores de calor.....	141
Anexo 27. Propuesta 3 ubicaciones de radiador para refrigeración de agua intercambiadores de calor.....	142
Anexo 28. Propuesta 4 ubicaciones del radiador para refrigeración de agua intercambiadores de calor.....	143
Anexo 29. Ubicación definitiva radiador para la refrigeración de agua intercambiadores de calor actual .....	144
Anexo 30. Cálculo de pérdidas de tubería condición inicial .....	145
Anexo 31. Cálculo de pérdidas de tubería propuesta 1 .....	146
Anexo 32. Cálculo de pérdidas de tubería propuesta 2 .....	146
Anexo 33. Cálculo de pérdidas de tubería propuesta 3 .....	147
Anexo 34. Cálculo de pérdidas de tubería propuesta 4 .....	148
Anexo 35. Cálculo de pérdidas de tubería, montaje definitivo .....	148
Anexo 36. Rugosidad de conducto valores de diseño .....	149
Anexo 37. Resistencia en válvulas y juntas expresadas con longitud equivalente en diámetros de ductos.....	150
Anexo 38. Factor de fricción en zona de turbulencia completa para ductos de acero comercial y limpio .....	151
Anexo 39. Coeficiente de dilatación K .....	151
Anexo 40. Circuito eléctrico de sistema de control para las bombas y ventiladores de los intercambiadores de calor .....	152
Anexo 41. Circuito eléctrico del sistema de potencia para bombas y ventiladores de los intercambiadores de calor .....	153
Anexo 42. Diagrama de Moore para refrigerante R-134a .....	154
Anexo 43. Diagrama de Moore para refrigerante R-404A.....	155
Anexo 44. Diagrama de Moore para refrigerante R-407C .....	156
Anexo 45. Diagrama de Moore para refrigerante R-22.....	157

## GLOSARIO

**A.S.T.M.:** American Society for Testing Materials. Contribuyente técnico del ISO líder en la definición de materiales y métodos de prueba en las industrias.

**Calor:** Energía que se transfiere desde un punto de alta temperatura hacia uno de baja temperatura. Pueden ocurrir fenómenos físicos como dilatación, fundición, volatilizar o descomponer.

**Calor Específico:** Transferencia de una unidad de masa de una sustancia para cambiar su temperatura en un grado. Se denota con la sigla  $C_p$ .

**Calor Latente:** Es aquel calor que sin cambiar la temperatura de un cuerpo, produce en él un cambio significativo, esto se puede observar en el caso de la ebullición del agua (o cualquier otro cambio de fase o estado), en la que se puede apreciar que la temperatura a la cual comienza a hervir el agua es la misma hasta que esta termina de evaporarse por completo, pero durante este proceso se le ha suministrado al sistema una gran cantidad de energía en forma de calor. En el caso de un fluido cuando este entrega o recibe calor latente es cuando hay mayor flujo o transferencia de calor.

**Caudal:** Es cantidad de volumen fluyendo en determinado tiempo (litros, galones,  $m^3$ , etc.), también conocido como flujo volumétrico; se expresa en unidades de volumen por unidad de tiempo.

Ejemplo: l/h (número de litros por cada hora), gal/min (número de galones por cada minuto),  $m^3/s$  (número de metros cúbicos por cada segundo), etc.

**Coeficientes de Transferencia de Calor:** Determinan la viabilidad con la que se transfiere calor a través de un medio.

**Coeficientes individuales de transferencia de calor:** Es el coeficiente de transferencia de calor para una sola fase.

**Coeficiente Global de Transferencia de Calor:** El coeficiente global se obtiene a partir de los coeficientes individuales y de la resistencia de la pared del tubo. Por lo que representa la viabilidad a la transferencia de calor para varias fases.

**Conductividad Térmica:** La conductividad térmica es una característica de todo material que representa la viabilidad con la que se transfiere calor.

**Conducción:** Mecanismo de transferencia de calor determinado por la vibración molecular y por los electrones libres, razón por la cual el mecanismo de transferencia de calor prevalece en sólidos y en metales.

**Convección:** Mecanismo determinado por la transmisión conductiva de calor entre las partículas de un fluido que se mueven distintos, es decir hay un movimiento de masa que contribuye a mejorar la transferencia de calor.

Las fuerzas utilizadas para crear las corrientes de convección en los fluidos son de dos tipos:

- **Convección natural:** Ocurre si las corrientes son la consecuencia de las fuerzas de flotación generadas por la diferencia de densidad, que a su vez se generan por gradientes de temperatura en la masa de fluido.
- **Convección forzada:** Ocurre cuando las corrientes se ponen en movimiento por acción de algún dispositivo mecánico, tal como una bomba o un agitador.

**Densidad:** Es la concentración espacial de la materia siendo la relación que existe entre la masa de un cuerpo y el volumen que ocupa esa masa. También es definida como la relación de la masa específica a una temperatura dada. Se expresa en unidades de masa sobre volumen.

**Diferencia de Temperatura:** Es la diferencia que existe entre la temperatura de un cuerpo y otro. Una diferencia de temperatura es la fuerza motriz mediante el calor se transfiere desde la fuente al receptor.

**Fluido:** Un fluido es una sustancia que se deforma continuamente cuando se le aplica una fuerza tangencial (de lado), por más pequeña que esta sea.

**Flujo en Contracorriente:** Es cuando en un intercambiador de calor ambos fluidos tanto el fluido caliente como el frío circulan con la misma dirección pero en diferente sentido.

**Flujo Cruzado:** Es cuando en un intercambiador de calor se pasa un fluido por un haz de tubos y el otro fluido pasa perpendicular a este haz de tubos.

**Flujo en Paralelo:** Es cuando en un intercambiador de calor ambos fluidos tanto el fluido caliente como el frío circulan con la misma dirección y sentido.

**Flujo Másico:** Es cantidad de materia expresada en unidades de masa (Kilogramos, gramos, libras toneladas, etc.), que pasa por un área específica en un determinado intervalo de tiempo; y se expresa en unidades de masa por unidad de tiempo.

**Presión:** La presión es la fuerza superficial que ejerce un fluido sobre las paredes del recipiente que lo contiene.

**Régimen Laminar:** Este régimen se presenta para bajas tasas de flujo (cuando la velocidad de flujo es baja  $Re < 2300$ ) y ocurre cuando deslizan suaves capas, láminas de fluido una sobre la otra y presenta las siguientes características:

- Es ordenado, unidireccional.
- Ocurre mezcla a niveles moleculares (nivel microscópico).
- Tiene un perfil de velocidad parabólico.

**Régimen Turbulento:** Cuando un líquido fluye en un tubo horizontal, lo hace en forma de torbellino no localizado. (Velocidad de flujo  $Re > 2300$ ).

**Temperatura:** Es la medición indirecta de la actividad de las partículas y se expresa en unidades como son: °C, °F, K y R.

**T.E.M.A.:** (Tubular Exchanger Manufacturers Association). Asociación de constructores de intercambiadores de calor de tipo tubular. Las normas rigen a los intercambiadores de calor del tipo “haz- envolvente” y lo hace por medio de las siglas R clase 1, C clase 2 y B clase 3.

**Transferencia de calor:** Se ha descrito a la transferencia de calor como el estudio de las velocidades a las cuales el calor se intercambia entre fuentes de calor y recibidores, tratados usualmente de manera independiente. Los procesos de transferencia de calor se relacionan con las razones de intercambio térmico, tales como las que ocurren en los equipos de transferencia de calor. Los tipos de transferencia de calor son conducción, convección y radiación.

**Velocidad:** Es la relación que existe entre la distancia recorrida y el tiempo que se emplea en recorrerla, es decir, la rapidez con que se mueve un cuerpo.

**Viscosidad:** La viscosidad es una medida de la resistencia de un fluido a fluir. A mayor viscosidad, el líquido fluye de modo más lento. La viscosidad de un líquido comúnmente disminuye cuando aumenta la temperatura.

## INTRODUCCIÓN

El presente proyecto está enfocado a la solución de la problemática que se evidencia con respecto a la circulación de agua fría que fluye internamente por los intercambiadores de calor (tubos con coraza y tubos concéntricos). Dichos equipos, que se encuentran conectados en serie a una caldera pirotubular pequeña, realizan un proceso de transferencia de calor junto con el agua fría logrando condensar el vapor proveniente de la caldera. Verificando el proceso realizado, se observa que en un tiempo determinado el agua fría aumenta su temperatura linealmente hasta llegar a 80 °C; la causa de la falla se genera por que la trayectoria del líquido refrigerante no tiene un equipo que logré estabilizar su temperatura, provocando la terminación de la práctica de laboratorio en los equipos intervenidos y por lo cual fue necesario formularse el siguiente interrogante: ***¿Cuál es la mejor opción de diseño para un sistema de enfriamiento que logre mantener la temperatura del fluido frío?***

Es de vital importancia proponer, calcular, construir y poner a punto un equipo de refrigeración que tenga como objetivo principal mantener la temperatura del fluido frío en los intercambiadores de calor, aumentando así la eficiencia de los mismos y contribuyendo a que se generen prácticas de laboratorio más completas.

El diseño y construcción del dispositivo que mantendrá la temperatura del agua concluirá una serie de trabajos previos que han sido unidos para brindar soporte teórico-práctico con relación a temas termodinámicos y de transferencia de calor, por lo cual al acoplarse al conjunto de equipos, contribuirá a la facilidad de captación de información de temas térmicos mediante la práctica, visualizando artefactos que eviten calor como también maquinas que lo disipan.

Para el desarrollo del siguiente trabajo, se seguirá una serie de pasos que van a ser determinantes a la hora de seleccionar el equipo apropiado para que realice el proceso de estabilización de la temperatura del agua. Es indispensable realizar varias pruebas que nos indiquen el estado actual de las máquinas donde se tomarán los datos relevantes que serán la base para proceder a buscar los mecanismos que puedan ofrecer el mejor servicio al momento de refrigerar el fluido frío. Posteriormente a la exploración, se seleccionarán tres equipos que posean las características específicas para mantener la temperatura de líquidos, luego se calcularán de las variables determinantes, señalando lo efectivos que son los equipos para la situación que se está presentando; se comparan las tres máquinas por separado, demostrando cual es el definitivo y se continuará con la fabricación, montaje y puesta a punto del dispositivo seleccionado. Como último paso se comprobarán los resultados obtenidos al inicio del proyecto con respecto a los datos finales de temperatura donde se evidenciara el beneficio del nuevo equipo.

## **OBJETIVOS**

### **OBJETIVO GENERAL**

Diseñar, construir, instalar y poner a punto un sistema de enfriamiento para el circuito térmico de los intercambiadores de calor (coraza-tubos y tubos concéntricos) ubicada en la sede j del laboratorio de termo fluido.

### **OBJETIVO ESPECÍFICO**

- . Obtener información correspondiente al funcionamiento de los equipos mediante la comparación de los trabajos anteriores y validando los resultados con las corridas experimentales.
- .Dimensionar el equipo de acuerdo a las condiciones del proceso, calculando las variables críticas que intervienen en el diseño del nuevo equipo de refrigeración.
- .Seleccionar el equipo más adecuado para el funcionamiento de equipo.
- .Construir, instalar y poner a punto el sistema de enfriamiento para mejorar la eficiencia en el proceso, manteniendo la temperatura estable de toda la línea de fluido frío en los intercambiadores de calor.
- .Revisar y mejorar las guías de laboratorio propuestas para todo el circuito térmico.



## **1. GENERALIDADES DE LOS SISTEMAS DE ENFRIAMIENTO Y REFRIGERACIÓN**

Este capítulo consta de seis (6) partes, las cuales se encuentran divididas de la siguiente manera: Inicialmente se clasificará los componentes comunes de los sistemas enfriamiento y refrigeración en aire y líquido; seguidamente se abordará el sistema de aire acondicionado, sus componentes básicos, sus refrigerantes comunes y sus aplicaciones; a continuación, se explicara el sistema de torres de enfriamiento, su funcionamiento, eficiencia, rendimiento y sus aplicaciones; posteriormente, se expondrá el sistema de radiadores, sus componentes principales y tipos; consecutivamente se presentara el sistema de tubos con aletas, los materiales de fabricación de aletas, la eficiencia de la aleta, la efectividad de la aleta y sus aplicaciones; y finalmente se describirá el Water Chiller (Enfriador de agua), sus componentes básicos y secundarios, sus refrigerantes comunes y sus aplicaciones.

### **1.1. Clasificación de los sistemas de enfriamiento y refrigeración**

Los sistemas de refrigeración han evolucionado a través del tiempo, debido a las necesidades sociales y cambios constantes en la tecnología, la cual evidencia mejoras de acuerdo a la invención en varios campos sociales; aportando con esto a mejorar la calidad de vida de las comunidades.

La clasificación de la refrigeración evidencia muchos campos, los más comunes son la conservación de alimentos, ambientación de espacios, enfriamiento de equipos y desarrollo tecnológico con computadoras [1].

Los parámetros para escoger los sistemas de refrigeración dependen en gran medida, a la carga térmica que se desea extraer, su posición e instalación y el costo y posterior mantenimiento [1].

#### ***1.1.1. Sistema de refrigeración por Aire***

Los sistemas de refrigeración se dividen en sistemas de aire y agua, para los sistemas de aire, las aletas vienen grandes, para conseguir una mayor disipación de calor, mantienen una dirección paralela a la dirección del movimiento del aire. Para obtener un mayor rendimiento las aletas son más profundas, pequeñas y precisas en los puntos más calientes [1].



*Figura 1. Aletas [2].*

Las maquinas o motores que manejan el sistema de refrigeración por aire manejan un gran ventilador eléctrico el cual dirige el aire hacia las aletas, tienen como ventajas; fácil construcción, no necesita aditamentos auxiliares para su enfriamiento tales como bombas de agua, tubos y un líquido refrigerante [3].

Asimismo tiene como desventajas que en cuanto sea más grande el motor o máquina es menos eficaz, ya que necesita un ventilador grande, el cual gastara más energía en su funcionamiento, además manejan grandes cantidades de ruido, el cual genera contaminación auditiva [3].

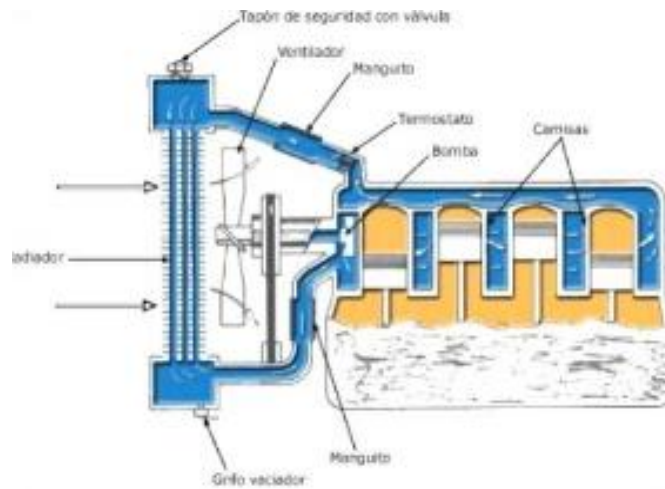


*Figura 2. Refrigeración por aire [4].*

### *1.1.2. Sistema de refrigeración por Líquido*

Los sistemas de refrigeración por agua son los más utilizados, los motores de vehículos livianos y de carga son un fiel ejemplo en la cotidianidad, en consecuencia manejan la dispersión de calor, dado que al pasar por las partes de un motor donde circula agua, disipa el exceso de calor, recoge el calor con el agua

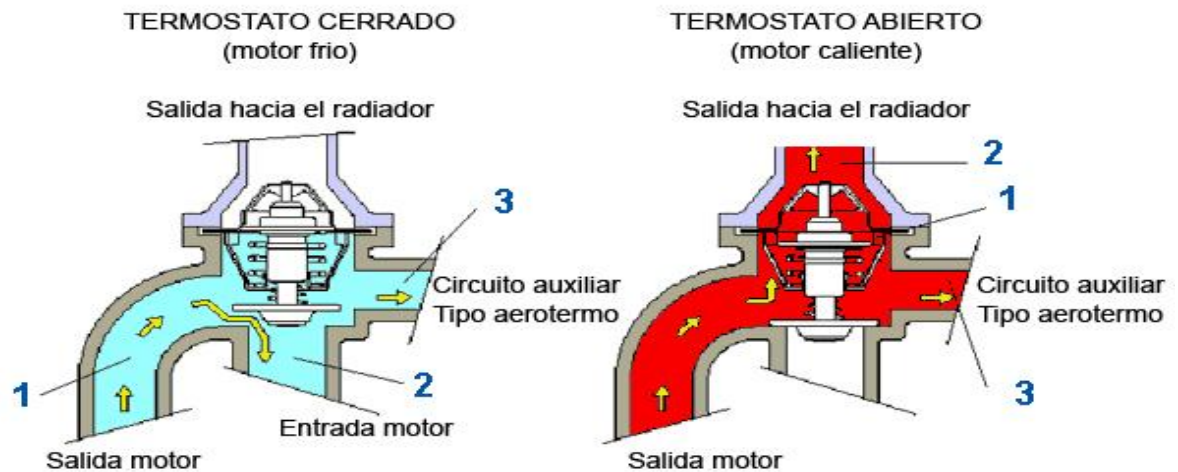
y lo conduce hasta un radiador donde lo enfría y lleva de nuevo a las partes del motor para hacer una nueva circulación [3].



**Figura 3. Sistema de refrigeración por agua [5].**

El sistema de refrigeración de agua tiene como componentes principales: Termostato, Radiador, Ventilador, Mangueras de conexión, Bomba de agua, Depósito recuperador y líquido refrigerante (agua y/o etileno-glicol).

El termostato es una válvula térmica, la cual se dilata o contrae de acuerdo a las variaciones de temperatura del líquido refrigerante [6].



**Figura 4. Termostato y su ciclo [7].**

El radiador es la principal parte del sistema de refrigeración en el motor de un vehículo, tiene como función, la evacuación del calor recolectado por el refrigerante en las diferentes partes del motor [6].



**Figura 5. Radiador [8].**

### **1.1.3. Componentes del sistema**

El ventilador es un instrumento el cual cambia el aire, y pone en movimiento el aire y genera una corriente de aire con un fin determinado; los ventiladores transforman la energía mecánica que proporciona un motor en energía cinética [6].



**Figura 6. Ventilador [9].**

La bomba de agua hace parte del sistema de refrigeración y tiene como función la circulación constante del líquido refrigerante asimismo impulsar el líquido caliente hacia el radiador para que el mismo realice su ciclo y consiga tener un equilibrio térmico en el motor [6].



*Figura 7. Bomba de agua [10].*

El depósito de recuperación permite establecer el nivel de refrigerante además de su temperatura y carga adecuada.



*Figura 8. Depósito de agua [11].*

## **1.2. Aire Acondicionado**

Se entiende por aire acondicionado como un sistema de refrigeración del aire que se encuentra en un recinto cerrado como pueden ser hogares, oficinas, establecimientos comerciales, etc. y es uno de los equipos más utilizados cuando hay temperaturas altas y calurosas en el ambiente. El objetivo general de este tipo de sistemas es proveer aire fresco que constantemente se renueva y puede realizar un proceso donde al aumentar humedad en el espacio cerrado, aumenta la temperatura del lugar como también puede realizar el proceso inverso para regular la temperatura o hasta mantenerla más baja que la temperatura del ambiente exterior [12].



**Figura 9. Variedad de equipos para aire acondicionado [13].**

### *1.2.1. Componentes Básicos*

El sistema de aire acondicionado, aunque tienen grandes variedades como equipos para ventana, portátiles, sin ductos o aire acondicionado central, son utilizados los mismos componentes para realizar el proceso de acondicionamiento de aire [14].

#### *1.2.1.1. Refrigerantes*

Fluido que realiza el proceso de cambios de estado de líquido a vapor para absorber el calor del ambiente cerrado y luego nuevamente pasa de vapor a líquido para expulsar el calor al ambiente exterior.

#### *1.2.1.2. Compresor*

Elemento encargado de tomar el refrigerante en estado vapor saturado de baja presión y llevarlo a un estado de vapor sobrecalentado a alta presión.

#### *1.2.1.3. Condensador*

Conectado al compresor, el refrigerante pasa por las bobinas con aletas que cumplen la función de extraer el calor del vapor sobrecalentado y a medida que se transporta por este, disminuye la temperatura y cambia de estado de vapor a líquido.

#### *1.2.1.4. Válvula de expansión*

Luego de pasar por el condensador, el líquido caliente del refrigerante pasa por una abertura pequeña por el extremo superior y en el inferior se expande el vapor a baja presión y baja temperatura, logrando un estado líquido-vapor que luego se conectara al evaporador.

#### 1.2.1.5. Evaporador

Elemento situado en el recinto cerrado donde se necesita el aire con baja temperatura. Al entrar el refrigerante al serpentín del evaporador, el aire caliente pasa por la parte exterior de los tubos y por el centro se transporta el líquido frío realizando transferencia de calor y mientras fluye el aire, se disminuye la temperatura, el cual se dirige hacia el recinto cerrado generando un aire de conformidad para los usuarios adentro del cuarto cerrado. Por el contrario el refrigerante sigue su trayectoria por el serpentín y a medida que recibe el calor del aire, este cambia nuevamente de estado de líquido frío a vapor caliente y nuevamente pasa por el compresor y continúa el ciclo termodinámico.

#### 1.2.2. Refrigerantes Comunes

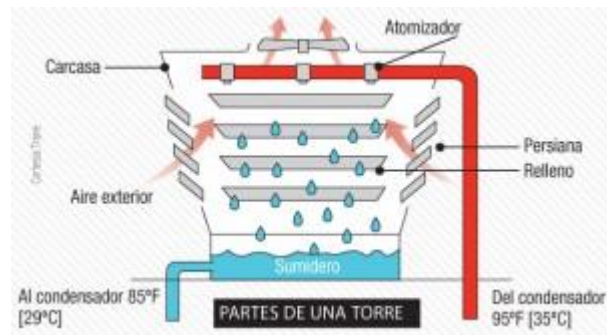
Para este tipo de equipos se utilizan los refrigerantes **R22** y **R134a** los cuales tienen aplicaciones para el sector doméstico como para el sector industrial. En la actualidad se está reemplazando los refrigerantes **HCFCs** (Hidroclorofluorocarbonados) que afectan la capa de ozono, como lo es el R22 y que tiene sustitutos como el R134a, R410a y R407C que son compuestos **HFCs** (Hidrofluorocarbonos) los cuales no poseen ninguna molécula de cloro y por consiguiente no afectan a la capa de ozono [15].

#### 1.2.3. Aplicaciones

Las aplicaciones más habituales para el aire acondicionado se remontan al sector doméstico cuando se encuentra en una parte de mundo donde se posean las estaciones del clima. Otros sectores pueden ser comercial, distribución alimentaria e industrial.

### 1.3. Torres de Enfriamiento

Las torres de enfriamiento son equipos de transferencia de calor y masa entre el aire atmosférico y el agua caliente procedente de los procesos industriales. Son equipos que se utilizan para enfriar agua en grandes volúmenes [16]. La capacidad de enfriamiento de la torre es directamente proporcional a la superficie de contacto aire-agua y al tiempo de contacto.



**Figura 10. Torre de enfriamiento [17].**

### 1.3.1. Funcionamiento

Cuando una gota de agua se pone en contacto con el aire, se produce la evaporación de la película exterior de la gota, requiriéndose para este proceso la absorción de calor. La evaporación consume aproximadamente 1% del caudal total de agua por cada 7°C en que reduce su temperatura. El calor requerido para la evaporación se toma de la propia gota, enfriándola consecuentemente. Por tanto, el enfriamiento se realiza tanto por transferencia de calor sensible (cambio de temperatura) como de calor latente (cambio de estado físico) [16].

### 1.3.2. Eficiencia y rendimiento

La eficiencia de una torre puede calcularse como el cociente entre la energía retirada al agua y la máxima retirable, de acuerdo a las condiciones atmosféricas del sitio o en términos de temperaturas, puede expresarse como:

$$\eta = \frac{T_{\text{entrada agua}} - T_{\text{salida agua}}}{T_{\text{entrada agua}} - T_{\text{bh aire de entrada}}}$$

Una eficiencia superior al 60% refleja un buen desempeño de la torre, valores inferiores a este indican posibles problemas en los rellenos [16].

### 1.3.3. Aplicaciones

Algunas aplicación que se pueden mencionar de una torre de enfriamiento de agua son

- ✓ Sistemas de refrigeración
- ✓ Sistemas de aire acondicionado

En la parte industrial también se relacionan con procesos térmicos en la industria química, alimenticia, minera y en plantas termoeléctricas.

## 1.4. Radiadores



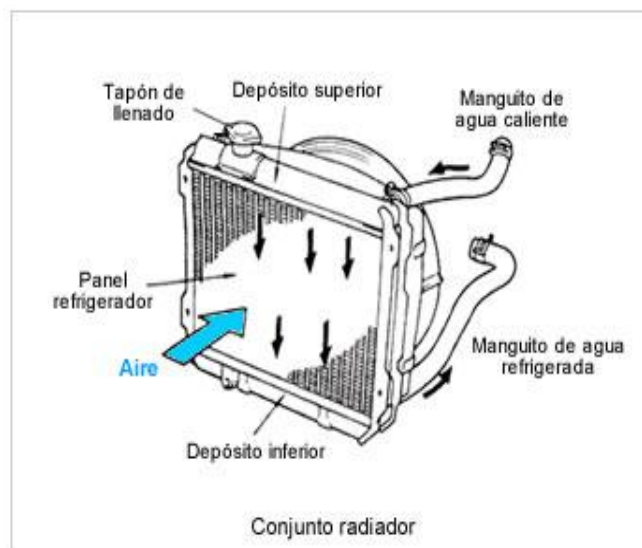
Según el Diccionario de la Real Lengua Española, un radiador es “Aparato metálico con gran desarrollo, por cuyo interior circula un fluido caliente que transmite calor al medio circundante [18].

El radiador es la principal parte del sistema de refrigeración en el motor de un vehículo, tiene como función, la evacuación del calor recolectado por el refrigerante en las diferentes partes del motor [19].

#### 1.4.1. Componentes principales

Las partes principales de un radiador son:

- Tapón de llenado
- Depósito superior
- Depósito inferior
- Panel de refrigeración
- Entrada de agua caliente
- Salida del agua refrigerada



**Figura 11. Partes del radiador [20].**

La temperatura del sistema de refrigeración fluctúa entre 80 °C y 110 °C, por tanto si funciona a bajas temperaturas no hace eficiente el funcionamiento del motor [21]. La transferencia de calor en el radiador se da por convección y conducción de un fluido caliente a uno frío, separados por una pared metálica; por esto los materiales de los tubos, aletas y paneles se hacen en aluminio, latón y cobre, suministrando con su conductibilidad térmica, la rápida salida de calor hacia el medio ambiente [19].

### 1.4.2. Tipos de radiadores

#### 1.4.2.1. Radiadores Tubulares

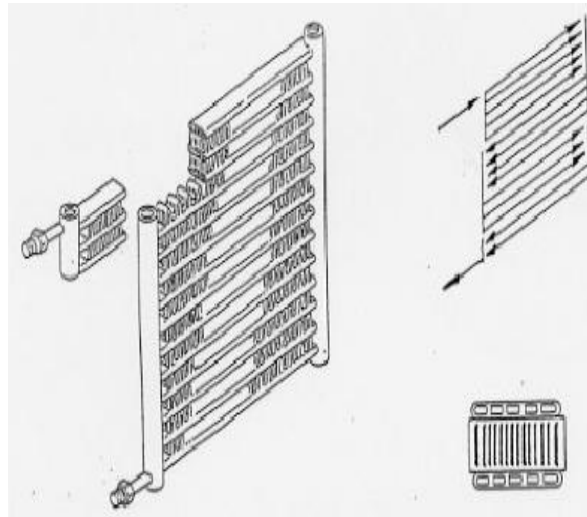
Tienen tubos planos y largos por donde el refrigerante pasa, con el calor que recoge, de la culata y cilindros de motor. Tiene aletas horizontales aleadas con la capacidad de obtener la mejor transferencia de calor [22].



*Figura 12. Radiador tubular [23].*

#### 1.4.2.2. Radiadores con tubo de aire

También llamados radiador de elementos rectos, están formados por finas cintas de cobre o latón, en donde el calor hace una cadena; primero pasa a las cintas y a su vez lo ceden al aire del ventilador que succiona por medio del radiador [22].



**Figura 13. Radiadores con tubo de aire [24].**

#### 1.4.2.3. Radiadores nido de abeja

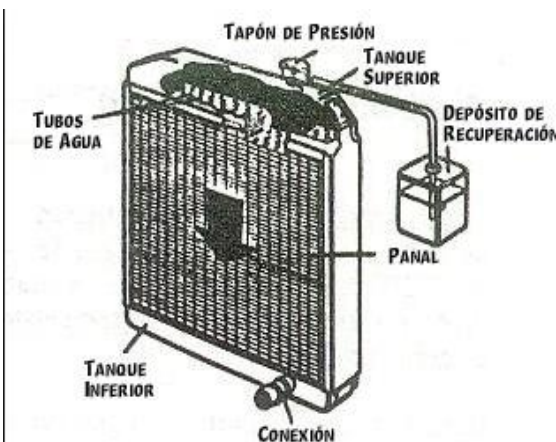
Es la unión de tubos hexagonales pequeños por donde pasa el aire, se encuentran muy unidos y por los mínimos orificios libres circula el líquido refrigerante; tiene como ventaja la relación entre el volumen de líquido refrigerante y la superficie que se expone a la corriente de aire [19].



**Figura 14. Radiadores nido de abeja [25].**

#### 1.4.2.4. Radiadores de circulación descendente

El líquido refrigerante entra por la parte superior y baja por los pequeños conductos, a ellos se unen las aletas, las cuales aumentan la superficie para lograr un mayor enfriamiento [19].



*Figura 15. Radiador de circulación descendente [26].*

#### 1.4.2.5. Radiadores de circulación transversal

El líquido refrigerante entra por la izquierda y circula por el número de conductos y de filas, hasta el otro tanque, por el ancho de la aleta es un radiador más eficaz [19].



*Figura 16. Radiador de circulación transversal [27].*

### 1.5. Tubos con Aletas

Se define como aleta la parte extendida de manera específica para aumentar la transferencia de calor, que se relaciona con la temperatura del tubo y del medio circundante, así mismo interviene el área superficial de transferencia de calor y el coeficiente de transferencia de calor, estas variables se expresa como la ley de enfriamiento de Newton:

$$\dot{Q} = hA_s(T_b - T_\infty)$$

Se conocen dos maneras que pueden ser utilizadas para incrementar el coeficiente de transferencia de calor, aumentar el coeficiente de transferencia de calor por convección ( $h$ ) o aumentar el área superficial ( $A_s$ ) [28].



**Figura 17. Tubos aletados [29].**

#### **1.5.1. Materiales de fabricación de las aletas**

Dependiendo de su aplicación se pueden fabricar con los siguientes materiales: cobre-aluminio, acero al carbón-aluminio, inoxidable-cobre, inoxidable-inoxidable y cobre-cobre.

#### **1.5.2. Eficiencia de la aleta**

El caso límite de resistencia térmica cero o conductancia térmica infinita la temperatura de la aleta será uniforme en el valor base de  $T_b$ . En este caso, la transferencia de calor desde la aleta será máxima. Sin embargo, en realidad la temperatura de la aleta cae a lo largo de ella y, por tanto, la transferencia de calor desde la misma será menor debido a la diferencia decreciente en la temperatura, hacia la punta [28].

$$\eta_{aleta} = \frac{\dot{Q}_{aleta}}{Q_{aleta\ maxima}}$$

$\dot{Q}_{aleta}$ : Razón real de la transferencia de calor desde la aleta

$Q_{aleta\ maxima}$ : Razón ideal de la transferencia de calor desde la aleta si tuviera toda la temperatura de la base

Un factor importante que interviene en el diseño de las superficies con aletas es la sección de la longitud de aleta que sea la más apropiada, por lo general si es larga la aleta es mayor el área de transferencia de calor, pero esto conlleva a aumentar más su masa y su precio.

#### **1.5.3. Efectividad de la aleta**

El desempeño de la aleta se juzga sobre la base de mejoramiento de la transferencia de calor comparado con el caso de no utilizar aletas, la ecuación que se emplea es el siguiente:

$$E_{total} = \frac{\dot{Q}_{total \text{ de aleta}}}{Q_{sin \text{ aleta}}}$$

#### 1.5.4. Aplicaciones

En la industria se pueden encontrar diversas aplicaciones como son:

- ✓Radiadores industriales
- ✓Condensadores
- ✓Secadores
- ✓Enfriadores de aceite
- ✓Evaporadores
- ✓Unidades manejadoras de agua

#### 1.6. Enfriador de Agua (Water Chiller)

El enfriador de agua o Water Chiller es un sistema para enfriamiento de líquidos que consta de cuatro elementos fundamentales como lo son el compresor, condensador, válvula de expansión y evaporador, que trabajando conjuntamente con un sistema de bombeo externo del líquido a enfriar, se logra refrigerar cualquier tipo de líquido que entre al evaporador a alta temperatura y al salir se obtiene la temperatura necesaria para un proceso determinado.

En el mercado se encuentran equipos desde 1.5 Toneladas de refrigeración (1 Tonelada de refrigeración = 12000 BTU/h) hasta 2000 Toneladas de refrigeración, dependiendo de la aplicación que se necesite el equipo.



**Figura 18. Chiller industrial [30].**

### *1.6.1. Componentes Básicos y secundarios*

Al igual que el aire acondicionado, se utilizan los mismos equipos necesarios, la diferencia es la aplicación. El aire acondicionado utiliza en el condensador y evaporador un sistema de intercambiadores de calor de modo que pueda pasar aire por unas celdas para poder extraer o absorber el calor, mientras que el chiller maneja otro sistema de transferencia de calor para el evaporador. Los siguientes son los componentes básicos y secundarios para el proceso de enfriamiento de líquidos [31].

#### 1.6.1.1.Compresor

Equipo similar al del aire acondicionado y es la parte más esencial para la refrigeración, es el encargado de circular el refrigerante en todos los componentes del chiller. Inicialmente succiona el vapor saturado a baja presión y temperatura para luego comprimirlo y aumentar la presión y temperatura hasta un punto que se pueda condensar por métodos normales como es el aire o agua.

#### 1.6.1.2.Condensador

Es un intercambiador de calor que puede de coraza-tubos (para condensación por agua) o de panel de aletas con ventilador (para condensación por aire). Conectado después del compresor, cumple la función de tomar vapor sobrecalentado y disminuir su temperatura logrando que cambie de estado de vapor a líquido.

#### 1.6.1.3.Válvula de expansión

También llamada válvula termostática o termostática de expansión. Realiza la labor de suministrar el líquido refrigerante necesario al evaporador para que se vaporice y obtenga la temperatura deseada. En este proceso de entrega, el refrigerante disminuye la presión y conjuntamente la temperatura.

#### 1.6.1.4.Evaporador

Generalmente es un intercambiador de calor de coraza-tubos donde se realiza el proceso de transferencia de calor entre el líquido a enfriar y el refrigerante en condiciones de saturación. Durante el transcurso del líquido y el refrigerante por el intercambiador, el fluido más frío (refrigerante) absorbe el calor del fluido más caliente (líquido a enfriar), por lo cual el refrigerante vuelve a realizar un cambio de estado de líquido a vapor para seguir por la línea de succión al compresor y seguir nuevamente con el ciclo.

#### 1.6.1.5.Elementos Secundarios

Para que el chiller funcione correctamente necesita de elementos adicionales que ayudan a que se cumpla el objetivo final del chiller, enfriar un líquido a la temperatura de operación del proceso requerido. Es así que es necesario un equipo externo que mantenga en tránsito el líquido que se necesita enfriar dentro del evaporador y el encargado de cumplir esta función es una bomba. Adicionalmente se debe de tener acoplada a la bomba un filtro de partículas para que el líquido no posea impurezas que puedan afectar el intercambiador de calor y un depósito de donde se puede tomar el fluido para enfriar. Otro de los elementos que, aunque no se mencione como componentes básicos, tiene mucha importancia porque son los componentes de control y medición para verificar la presión, temperatura y alimentación eléctrica que contribuyen a que se trabaje los rangos establecidos para el equipo y no se exceda en la capacidad de trabajo.

#### *1.6.2. Refrigerantes Comunes*

Como el aire acondicionado, se utiliza tradicionalmente el R-12 y R-22 como refrigerantes para realizar el proceso de enfriamiento de un fluido externo pero ambientalmente, son elementos que al exponerse al aire libre por medio de una fuga, pueden provocar un deterioro de la capa de ozono contribuyendo al sobrecalentamiento global. Actualmente se están generando refrigerantes que no provocan daños en la capa de ozono como el R-134a y R-407c y que a su vez también están siendo utilizados para este tipo de equipos de refrigeración [15].

#### *1.6.3. Aplicaciones*

Como equipo de enfriamiento se puede aplicar en la refrigeración de maquinaria industrial, plantas de procesos químicos, industrias alimenticias, industrias de plásticos, equipos de laboratorio, centros de cómputo y algunas veces como aire acondicionado. Adicionalmente el chiller también cuenta con la opción de trabajar en viceversa y cambiar a una aplicación de bomba de calor con aplicaciones como climatización y agua caliente sanitaria para grandes edificios y hospitales.



## **2. ANTECEDENTES DEL FUNCIONAMIENTO DE INTERCAMBIADORES DE CALOR (CORAZA-TUBOS Y TUBOS CONCÉNTRICOS) DEL LABORATORIO DE TERMOFLUIDOS**

Para la construcción de la planta piloto ECCI 3 ubicada en el laboratorio de termofluidos de la sede J, se recopilaron 3 diferentes proyectos presentados años atrás a la Universidad.

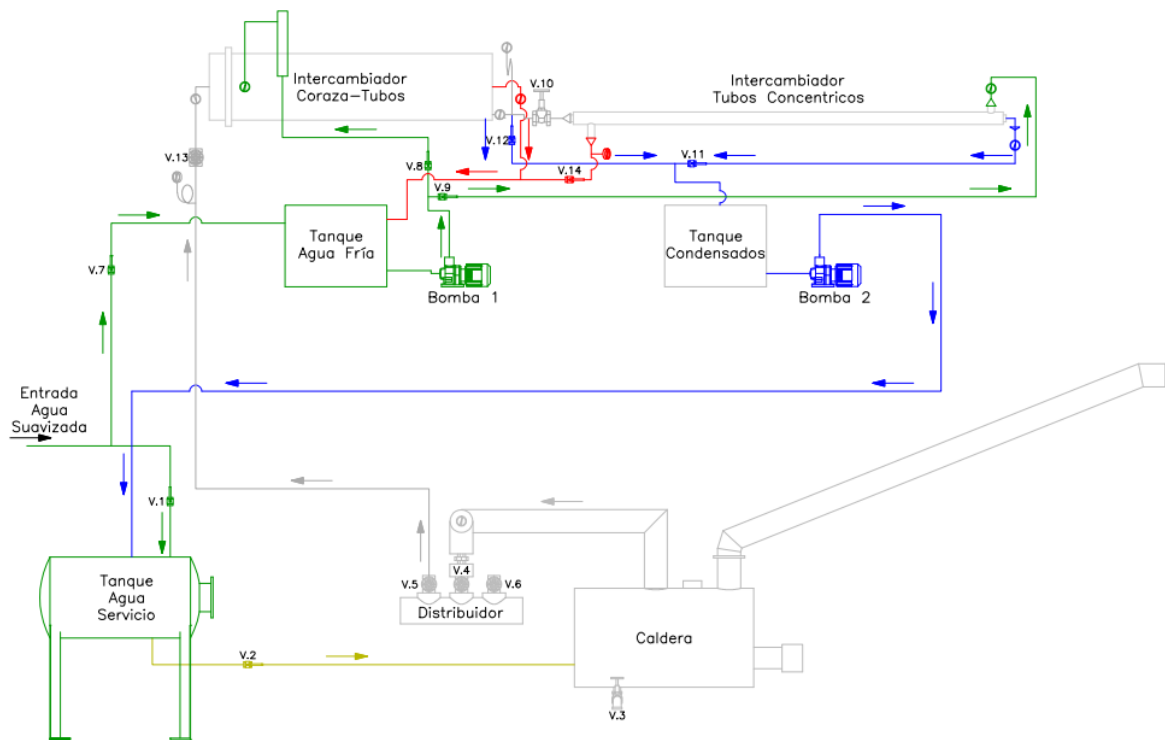
El trabajo que realizó el equipo de José David Barón Pinilla y Gustavo Andrés García Montaña se trató del adecuamiento de los intercambiadores y el acoplamiento de los mismos a la caldera pirotubular. Al correr el sistema caldera intercambiadores se evidenció que al transcurrir 59 minutos el fluido frío llegó hasta los 80°C generando ineficiencia en el intercambio de calor.

**Consideraciones para tener en cuenta:** al momento de iniciar a trabajar sobre el problema que se evidenció, se tiene que tener en cuenta algunos aspectos importantes que influyen en la conexión de los intercambiadores de calor y que fueron realizados por la tesis anterior, como:

- Para la adecuación de los intercambiadores fue necesario proyectar las líneas de fluido en tubería para vapor de ASTM -53 ½ in cal 40 de acero al carbono y para la línea de agua fría ½ in de acero galvanizado.
- Se toma fluido que viene del suavizador de la caldera ECCI 1.
- No aislaron los intercambiadores con aislantes por la prioridad de disipar la mayor cantidad de temperatura del sistema.
- Con la caldera en operación y con válvulas tipo cortina del distribuidor cerrado se llega a una presión de 25 psi a una temperatura de 115 °C, la presión es controlada por un presostato a 32 psi la presión de diseño es 55 psi.

### **2.1. Levantamiento de plano de la planta ECCI 3**

Para iniciar a trabajar en la planta ECCI 3, se realiza un bosquejo de lo existente en la planta, reconociendo elementos eléctricos, hidráulicos y recorridos de flujo.



**Figura 19. Diagrama de flujo del proceso actual**

## 2.2.Toma de datos y estado de la caldera

### 2.2.1. Primera toma de datos

Para el encendido de la caldera se utilizó el manual de operación y se contó con la asesoría de José David Barón Pinilla, el cual verificó su estado actual y se realizó una corrida. Se evidenció que la parte del retorno de los condensados en el distribuidor estaban tapados, también se pudo visualizar oxido que está dentro del sistema y algunos manómetros estaban pegados (ver Figura. 20). Después de unos minutos de funcionamiento el quemador se apaga solo, por consiguiente la caldera pierde presión y se decide apagar los equipos completos. Se solicita al ingeniero Carlos Navarro (jefe de talleres de la Universidad ECCI) realizar mantenimiento general de la caldera y accesorios de los intercambiadores de calor.



**Figura 20. Termómetro de entrada vapor**

✓ Datos obtenidos:

Caudal del agua de refrigeración para el intercambiador tubos con coraza 24 LPM o 96 GPM. Caudal del agua de refrigeración para intercambiador de calor tubos con coraza y tubos concéntricos 19 LPM o 56 GPM

### **2.2.2. Segunda toma de datos**

Después de realizar el debido mantenimiento de la caldera y accesorios de los intercambiadores, se enciende la plana ECCI 3 siguiendo los pasos del manual de operación y nuevamente con la asesoría de José David Barón Pinilla, para así llegar a realizar una toma de datos real de los equipos actuales (ver Tabla 1).

**Tabla 1. Toma de datos de agua de refrigeración intercambiador tubos con coraza**

Tiempo(min)	T1(°C)	T2 (°C)
5	16	24
10	24	39
15	43	50
20	54	61
25	66	71
30	75	80

Al momento que se cumplieron los 30 minutos de funcionamiento se evidenció que a la planta no le estaba llegando agua, sus niveles estaban muy bajos para seguir operando, se decidió entonces apagar la planta y revisar que la válvulas estuvieran abiertas desde tanque de agua suavizada hasta el tanque de la planta ECCI 3, y se pudo constatar que el problema no estaba en la planta si no que se encontraba baja la presión del agua en la sede J de la Universidad. Y por lo cual no se pudo seguir con la práctica

### 2.2.3. Tercera toma de datos.

En esta práctica de laboratorio, se tuvo que purgar el sistema ya que sobrepasaba los niveles indicados de agua para prender la planta (ver Figura 21).



**Figura 21. Purga de tanque de agua**

Después de realizar la purga se prendió la planta y se pudieron tomar los siguientes datos (ver Tabla 2).

**Tabla 2. Toma de datos intercambiador coraza - tubos**

Tiempo (min)	Intercambiador coraza- tubos			
	Entrada de vapor °C	Salida de vapor °C	Entrada de refrigerante °C	Salida de refrigerante °C
1	90	42	16	16
5	92	48	24	29
10	96	53	39	43
15	98	62	50	55
20	98	71	61	65
25	98	80	71	75
30	96	85	80	84

### 3. CÁLCULO DE EQUIPOS DE REFRIGERACIÓN

Mediante la consulta realizada con respecto a los equipos de refrigeración actuales y que podrían ser acoplados en el laboratorio de termofluidos, se seleccionaron tres tipos de sistemas que poseen características específicas para la refrigeración del agua. Es el caso del Water Chiller o enfriador de agua, Radiador y tubos aletados, que se pueden evidenciar en la industria como equipos que contribuyen brindando soporte en las líneas de agua para disminuir o mantener una temperatura específica dentro de un proceso.

#### 3.1. Cálculo de enfriador de agua (Chiller Water)

Sistema para enfriamiento de agua –Chiller- que funciona con dos intercambiadores de calor (uno para alta presión y el otro de baja presión), un compresor y una válvula de estrangulamiento o expansión como los elementos principales (ver Figura 22). Se estabiliza la temperatura del agua con un refrigerante que circula por los intercambiadores de calor y los demás componentes, mientras que el agua caliente también pasa por el intercambiador denominado “*Evaporador*” y hace transferencia de calor con el refrigerante y le disminuye la temperatura al final para que siga su proceso impulsado por una bomba dentro de las aplicaciones en las que se incluye este líquido. Por otro lado, el refrigerante al realizar el proceso de intercambio de calor con el agua cambia de estado y se vuelve vapor saturado donde, por succión, entra al *compresor* y eleva la presión del mismo hasta llevarlo a un estado de vapor sobrecalentado.

Posteriormente, pasa por el segundo intercambiador de calor, denominado “*Condensador*”, que hace transferencia de calor normalmente por convección forzada y a la vez baja la temperatura del refrigerante y cambiándole el estado de vapor sobrecalentado a líquido sub-enfriado. El siguiente paso para cerrar el ciclo es pasar el refrigerante por la *válvula de estrangulamiento* la cual se encarga de bajar la presión y generar un porcentaje de mezcla entre líquido y vapor llegando a la presión inicial de entrada del *evaporador*, completando así el ciclo para el Chiller.

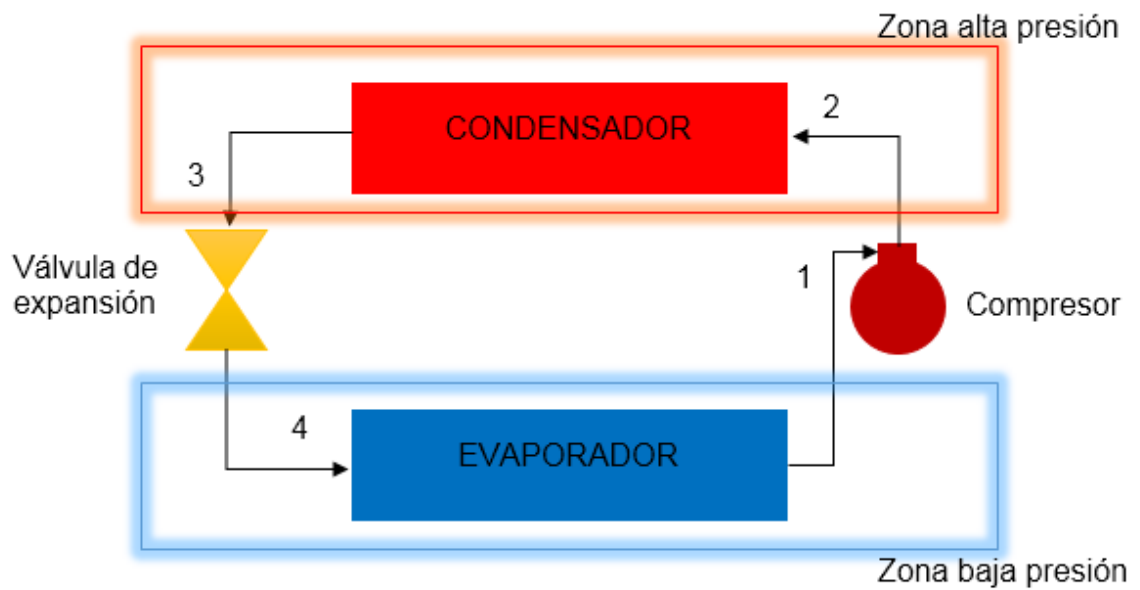


Figura 22. Ciclo termodinámico de chiller

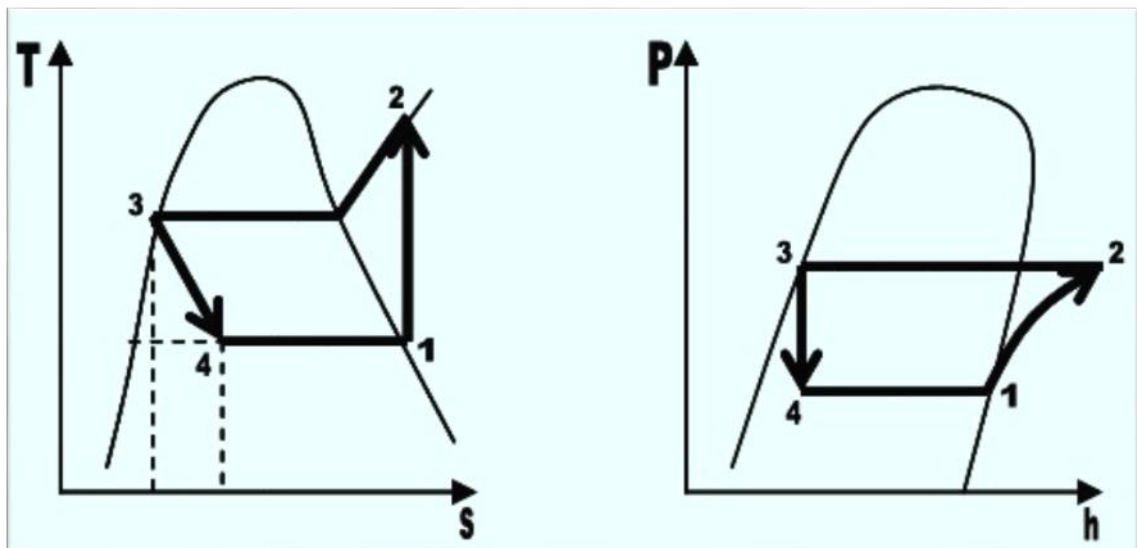


Figura 23. Diagrama termodinámico T-S y P-H [32].

### Datos iniciales del agua a refrigerar

$$T_{in H_2O} = 30^{\circ}C$$

$$T_{out H_2O} = 15^{\circ}C$$

$$c_{p@30^{\circ}C} = 4,178 \text{ kJ/kg} \cdot ^{\circ}C$$

$$\dot{Q}_{H_2O} = 30 \text{ Lpm} = 1,8 \text{ m}^3/h$$

$$\rho_{H_2O @ 30^\circ C} = 995,71 \text{ kg/m}^3$$

(Ver Anexo 1 y 2)

### 3.1.1. Proceso para cálculos termodinámicos de refrigerante

Inicialmente nos guiamos por teoría de intercambiadores de calor del libro de Kern donde especifica que es necesario que haya una diferencia de temperaturas entre los fluidos mínima de  $10^\circ C$ , por lo cual tomamos de entrada la temperatura entre  $20^\circ C$  y  $30^\circ C$  para el agua en el evaporador y con base a lo anterior decidimos que necesitamos de salida el agua entre  $5^\circ C$  y  $15^\circ C$  como la temperatura necesaria para que los intercambiadores actuales de coraza-tubos y tubos concéntricos sean lo más eficientes posibles. Partiendo de esto, se procede a realizar cálculos con los refrigerante *R-134a*, *R-22*, *R-407* y *R-422a* a una temperatura de  $5^\circ C$ ,  $10^\circ C$  y  $15^\circ C$  porque en el evaporador ahí un proceso isobárico e isotérmico (presión constante y temperatura constante).

Se consultó tablas termodinámicas específicas para el refrigerante seleccionado ver Anexo del 3 al 14 del fabricante DuPont y seguimos los siguientes pasos para realizar los cálculos:

1. Ubicar en las tablas de refrigerante saturado la temperatura del estado 1 (ver Figura 23) y se toma nota de los datos necesarios como lo son:  
 $T = \text{Temperatura } (^\circ C)$ ,  $P = \text{Presión } (kPa)$ ,  $h = \text{Entalpia } (kJ/kg)$  y  $s = \text{Entropía } (kJ/kg \cdot K)$
2. Determinar el calor que entra al evaporador con base al fluido caliente (agua).
3. Utilizar los mismos datos de presión y temperatura para hallar valor de calidad en la mezcla y con base en este determinar los valores de entalpia y entropía para el estado 4 (ver Figura 23).
4. En base a la entalpia del estado 4 se busca en las tablas de refrigerante saturado un valor similar o aproximado por encima y por debajo para posteriormente interpolar valores y hallar los mismos datos del paso 1 para el estado 3 (ver Figura 23), entendiendo que los valores de la presión y la temperatura son mayores mientras que los valores de entropía y entalpia son menores a los iniciales.
5. Por fórmulas sabemos que la presión del estado 3 es la misma que la del estado 2 (ver Figura 23) y también se comprende que la entropía del estado 1 es igual a la del estado 2, por consiguiente se procede a realizar búsqueda en las tablas de vapor sobrecalentado del refrigerante para hallar los valores

aproximados por encima y por debajo de la presión que se maneja en el condensador. Realizar las interpolaciones necesarias para hallar los valores con base a la presión del estado 3 y a la entropía del estado 1 y así completando los datos faltantes para el cálculo termodinámico.

6. Posteriormente se realiza el cálculo del trabajo del compresor, el calor que entra al evaporador, el calor que se disipa del condensador y el cálculo del coeficiente de rendimiento del ciclo de refrigeración.
7. Formular los datos de entrada para obtener el flujo de calor que entrega el agua caliente al refrigerante en el evaporador y hallar los valores de:  
 $\dot{m}_{ref}$  = Flujo másico del refrigerante y Potencia del compresor

Nota: Anexos 42 al 45 para ver las gráficas Presión vs. Entropía de los refrigerantes.

### 3.1.2. Ciclo termodinámico para refrigerante R-134a

- **Estado 1 (Vapor Saturado)**  
(Ver Anexo 11)

$$\begin{aligned}T_1 &= 15^\circ\text{C} \\P_1 &= 488,78 \text{ kPa} \\h_1 &= 407,3 \text{ kJ/kg} \\s_1 &= 1,7208 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}\end{aligned}$$

- ✓ Calor que entra al evaporador:

$$q_{entra} = c_{p_{30^\circ\text{C}, h_2\text{O}}} * \Delta T = 4,178 \text{ kJ/kg} \cdot ^\circ\text{C} * (30 - 15)^\circ\text{C}$$

$$q_{entra} = 62,67 \text{ kJ/kg}$$

- ✓ Cálculo de entalpía del estado 4:

$$\begin{aligned}q_{entra} &= h_1 - h_4 ; P_1 = P_4 \\62,67 \text{ kJ/kg} &= 407,3 \text{ kJ/kg} - h_4 \\h_4 &= 407,3 \text{ kJ/kg} - 62,67 \text{ kJ/kg} \\h_4 &= 344,63 \text{ kJ/kg}\end{aligned}$$



- **Estado 4 (Mezcla)**

✓ Ecuación para hallar mezcla:

$$x = \frac{h_4 - h_f}{h_{fg}}$$

$$x = \frac{(344,63 \text{ kJ/kg}) - (220,5 \text{ kJ/kg})}{(407,3 \text{ kJ/kg} - 220,5 \text{ kJ/kg})} = 0,6645$$

✓ Entropía del estado 4:

$$s_4 = s_f + x s_{fg}$$

$$s_4 = 1,0726 \text{ kJ/kg} \cdot K + 0,6645 * (1,7208 - 1,0726) \text{ kJ/kg} \cdot K$$

$$s_4 = 1,5033 \text{ kJ/kg} \cdot K$$

- **Estado 3 (Líquido Saturado)**  
(Ver Anexo 12)

$$w_{\text{Expansión}} = 0 ; h_3 = h_4$$

✓ Datos por encima de  $h_4 = 344,63 \text{ kJ/kg}$

$$T_{h_4=344,63 \text{ kJ/kg}} = 91^\circ C$$

$$P_{h_4=344,63 \text{ kJ/kg}} = 3309,78 \text{ kPa}$$

$$h_{h_4=344,63 \text{ kJ/kg}} = 345,7 \text{ kJ/kg}$$

$$s_{h_4=344,63 \text{ kJ/kg}} = 1,4466 \text{ kJ/kg} \cdot K$$

✓ Datos por debajo de  $h_4 = 344,63 \text{ kJ/kg}$

$$T_{h_4=344,63 \text{ kJ/kg}} = 90^\circ C$$

$$P_{h_4=344,63 \text{ kJ/kg}} = 3242,87 \text{ kPa}$$

$$h_{h_4=344,63 \text{ kJ/kg}} = 343,4 \text{ kJ/kg}$$

$$s_{h_4=344,63 \text{ kJ/kg}} = 1,4406 \text{ kJ/kg} \cdot K$$

- ✓ Datos interpolados linealmente para el estado 3:

$$\begin{aligned}T_3 &= 90,5348^\circ\text{C} \\P_3 &= 3278,6523 \text{ kPa} \\h_3 &= 344,63 \text{ kJ/kg} \\s_3 &= 1,4438 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}\end{aligned}$$

- **Estado 2 (Vapor Sobrecalentado)**

(Ver Anexo 13,14)

$$P_3 = P_2 ; s_1 = s_2$$

- ✓ Datos por encima de  $s_1 = 1,7208 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$  a  $3200 \text{ kPa}$

$$\begin{aligned}T_{s_1=1,7208 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}, 3200 \text{ kPa}} &= 100^\circ\text{C} \\P_{s_1=1,7208 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}, 3200 \text{ kPa}} &= 3200 \text{ kPa} \\h_{s_1=1,7208 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}, 3200 \text{ kPa}} &= 448,8 \text{ kJ/kg} \\s_1 &= 1,7208 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}\end{aligned}$$

- ✓ Datos por debajo de  $s_1 = 1,7208 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$  a  $3200 \text{ kPa}$

$$\begin{aligned}T_{s_1=1,7208 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}, 3200 \text{ kPa}} &= 95^\circ\text{C} \\P_{s_1=1,7208 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}, 3200 \text{ kPa}} &= 3200 \text{ kPa} \\h_{s_1=1,7208 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}, 3200 \text{ kPa}} &= 439,5 \text{ kJ/kg} \\s_1 &= 1,7208 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}\end{aligned}$$

Datos interpolados linealmente para el estado 2 a  $3200 \text{ kPa}$

$$\begin{aligned}T_{3200 \text{ kPa}} &= 98,0278^\circ\text{C} \\P_{3200 \text{ kPa}} &= 3200 \text{ kPa} \\h_{3200 \text{ kPa}} &= 445,13 \text{ kJ/kg} \\s_2 &= 1,7208 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}\end{aligned}$$

Datos por encima de  $s_1 = 1,7208 \text{ kJ/kg} \cdot K$  a  $3400 \text{ kPa}$

$$\begin{aligned} T_{s_1=1,7208 \text{ kJ/kg} \cdot K, 3400 \text{ kPa}} &= 105^\circ C \\ P_{s_1=1,7208 \text{ kJ/kg} \cdot K, 3400 \text{ kPa}} &= 3400 \text{ kPa} \\ h_{s_1=1,7208 \text{ kJ/kg} \cdot K, 3400 \text{ kPa}} &= 452,7 \text{ kJ/kg} \\ s_1 &= 1,7208 \text{ kJ/kg} \cdot K \end{aligned}$$

✓ Datos por debajo de  $s_1 = 1,7208 \text{ kJ/kg} \cdot K$  a  $3400 \text{ kPa}$

$$\begin{aligned} T_{s_1=1,7208 \text{ kJ/kg} \cdot K, 3400 \text{ kPa}} &= 100^\circ C \\ P_{s_1=1,7208 \text{ kJ/kg} \cdot K, 3400 \text{ kPa}} &= 3400 \text{ kPa} \\ h_{s_1=1,7208 \text{ kJ/kg} \cdot K, 3400 \text{ kPa}} &= 443,4 \text{ kJ/kg} \\ s_1 &= 1,7208 \text{ kJ/kg} \cdot K \end{aligned}$$

✓ Datos interpolados linealmente para el estado 2 a  $3400 \text{ kPa}$

$$\begin{aligned} T_{3400 \text{ kPa}} &= 101,5384^\circ C \\ P_{3400 \text{ kPa}} &= 3400 \text{ kPa} \\ h_{3400 \text{ kPa}} &= 446,26 \text{ kJ/kg} \\ s_2 &= 1,7208 \text{ kJ/kg} \cdot K \end{aligned}$$

✓ Datos interpolados linealmente para el estado 2 definitivos

$$\begin{aligned} T_2 &= 99,4084^\circ C \\ P_2 &= 3278,6523 \text{ kPa} \\ h_2 &= 445,58 \text{ kJ/kg} \\ s_2 &= 1,7208 \text{ kJ/kg} \cdot K \end{aligned}$$

3.1.3. Calor del evaporador y condensador, trabajo del compresor y coeficiente de rendimiento

- ✓ Trabajo del compresor

$$w_c = h_2 - h_1 = 445,58 \text{ kJ/kg} - 407,3 \text{ kJ/kg}$$

$$w_c = 38,2761 \text{ kJ/kg}$$

- ✓ Calor en el Evaporador y Condensador

$$q_{\text{evaporador}} = h_1 - h_4 = 407,3 \text{ kJ/kg} - 344,63 \text{ kJ/kg}$$

$$q_{\text{evaporador}} = 62,67 \text{ kJ/kg}$$

$$q_{\text{condensador}} = h_2 - h_3 = 445,58 \text{ kJ/kg} - 344,63 \text{ kJ/kg}$$

$$q_{\text{condensador}} = 100,95 \text{ kJ/kg}$$

- ✓ Coeficiente de rendimiento

$$C_R = \frac{q_{\text{evaporador}}}{w_c} = \frac{62,67 \text{ kJ/kg}}{38,2761 \text{ kJ/kg}} = 1,6373$$

### 3.1.4. Cálculo de Flujo de calor del agua caliente, flujo másico del refrigerante y potencia del compresor

- ✓ Cálculo de flujo de calor

$$\rho = \frac{\dot{m}}{\dot{V}} \rightarrow \dot{m} = \rho * \dot{V} = 995,71 \text{ kg/m}^3 * 1,8 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

$$\dot{m}_{H_2O} = 1792,278 \text{ kg/h}$$

$$\dot{Q}_{H_2O} = \dot{m}_{H_2O} * q_{\text{entra}} = 1792,278 \text{ kg/h} * 62,67 \text{ kJ/kg}$$

$$\dot{Q}_{H_2O} = 112322,06226 \text{ kJ/h}$$

- ✓ Flujo másico del refrigerante

$$\dot{m}_{\text{ref}} = \frac{\dot{Q}_{H_2O}}{q_{\text{evaporador}}} = \frac{112322,06226 \text{ kJ/h}}{62,67 \text{ kJ/kg}}$$

$$\dot{m}_{\text{ref}} = 1792,278 \text{ kg/h}$$

✓ Potencia del compresor

$$P_{compresor} = w_c * \dot{m}_{ref} = 38,2761 \frac{kJ}{kg} * 1792,278 \frac{kg}{h}$$
$$P_{compresor} = 68601,4597 \frac{kJ}{h} = 19,0559 kW = 25,55 HP$$

Para los cálculos de los refrigerantes *R-407*, *R-422a* y *R-22* puede dirigirse a los documentos Anexos 16,17 y 18 respectivamente, para verificar que se procede con los mismo pasos al igual que con el *R-134a* (ver Anexo 15).

### 3.2. Cálculo de Tubos con aletas

Una de las opciones que se presenta es la de utilizar tubos aleteados, se trabaja con datos provenientes del proveedor AV THERMO INGENIERIA SAS, el cual brinda información detallada de tubos aleteados, dando opciones en el número de las aletas por metro de longitud del tubo y opción de compra desde **0.50m a 6 m** de tubo aleteado

- Conductividad térmica de la aletas en aluminio (**k**): **209.3 W/m c**
- Coeficiente de transferencia de calor (**h**): **5 W/m<sup>2</sup> c** ; tomado de la tabla de valores típicos para los coeficientes de transferencia de calor como base para realizar cálculo (ver anexo 19).
- Paso entre aletas: **2.77 \* 10<sup>-3</sup> m**
- Espesor de la aleta: **4 \* 10<sup>-4</sup> m**
- Diámetro del tubo exterior : **0.0127 m**
- Diámetro del tubo con aletas: **0.0467 m**
- Longitud del tubo: **1 m**

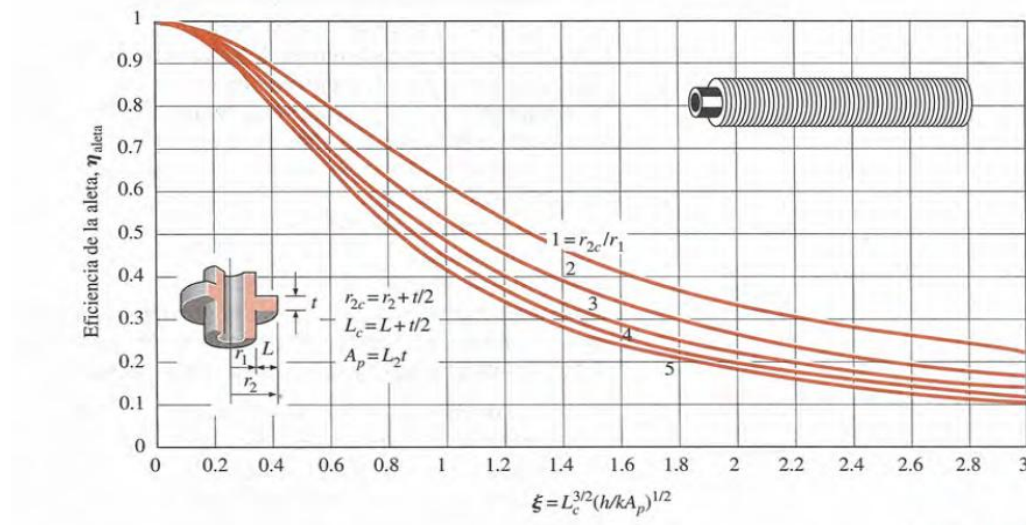
#### 3.2.1. Cálculos de tubo aleteado

Transferencia de calor del tubo por un metro de longitud, sin aletas utilizando la ley de Newton del enfriamiento [28]:

$$\dot{Q} = hA_{sin aleta}(T_b - T_{\infty})$$
$$\dot{Q} = 5 \frac{W}{m^2 c} (\pi * 0.0127 m * 1 m) (30^{\circ}C - 20^{\circ}C)$$
$$\dot{Q}_{sin aleta} = 1.994 W$$

✓ Transferencia de calor con aletas

Para el cálculo de la transferencia de calor con aletas se utilizó la Figura 24 para hallar la eficiencia de las aletas



**Figura 24. Eficiencia de aletas circulares de espesor constante  $t$  [28].**

✓ Cálculo del radio corregido

Para este cálculo se utiliza la ecuación que está en la Figura 24.

$$r_{2c} = r_2 + \frac{t}{2}$$

Se tiene el radio del tubo con aleta ( $r_2$ ) = 0.0235m

El espesor de la aleta ( $t$ ) =  $4 \times 10^{-4}$ m

Se reemplaza la ecuación y se obtiene:

$$r_{2c} = r_2 + \frac{t}{2} = 0.0235m + \frac{4 \times 10^{-4}m}{2} = 0.0237m$$

✓ Cálculo de altura corregida de la aleta

Para este cálculo se utiliza la ecuación que está en la Fig. 24

$$L_c = L + \frac{t}{2}$$

En esta ecuación se necesita calcular la altura de la aleta (**L**) para hallar este valor se utiliza la siguiente ecuación

$$L = \frac{1}{2}(D_2 - D_1)$$

Donde (**D<sub>2</sub>**) es el diámetro del tubo con aletas que corresponde a: 0.0467m y (**D<sub>1</sub>**) es el diámetro externo del tubo: 0.0127m se reemplaza la ecuación y se halla la altura de la aleta

$$L = \frac{1}{2}(D_2 - D_1) = \frac{1}{2}(0.0467m - 0.0127m) = 0.017m$$

Conociendo el valor de **L** se halla la altura corregida de la aleta

$$L_c = L + \frac{t}{2} = 0.017m + \frac{4 \cdot 10^{-4}m}{2} = 0.0172m$$

$$A_p = L_c t = 0.0172m \cdot 4 \cdot 10^{-4}m = 6.88 \cdot 10^{-6}m^2$$

✓ Calculo de diferencia entre radios

$$\frac{r_{2c}}{r_1} = \frac{0.0237m}{6.35 \cdot 10^{-3}m} = 3.732$$

✓ Calculo de la eficiencia

Para ello se tiene la siguiente ecuación

$$\xi = L_c^{3/2} \sqrt{\frac{h}{KA_p}}$$

Conductividad térmica del aluminio (**k**): 209.3 W/m c

Coeficiente de transferencia de calor (**h**): 5 W/m<sup>2</sup>c

Altura corregida de la aleta **L<sub>c</sub>**: 0.0172m

$$A_p: 6.88 \cdot 10^{-6}m^2$$

Reemplazando la ecuación se obtiene

$$\xi = L_c^{3/2} \sqrt{\frac{h}{KA_p}} = 0.0172 m^{3/2} \sqrt{\frac{5 \frac{W}{m^2 c}}{209.3 \frac{W}{m^2 c} \cdot 6.88 \cdot 10^{-6} m^2}} = 0.132$$

De acuerdo a la Figura 25 de aletas circulares, se valida que la eficiencia es de 98%  $\approx 0.98$  aproximadamente.

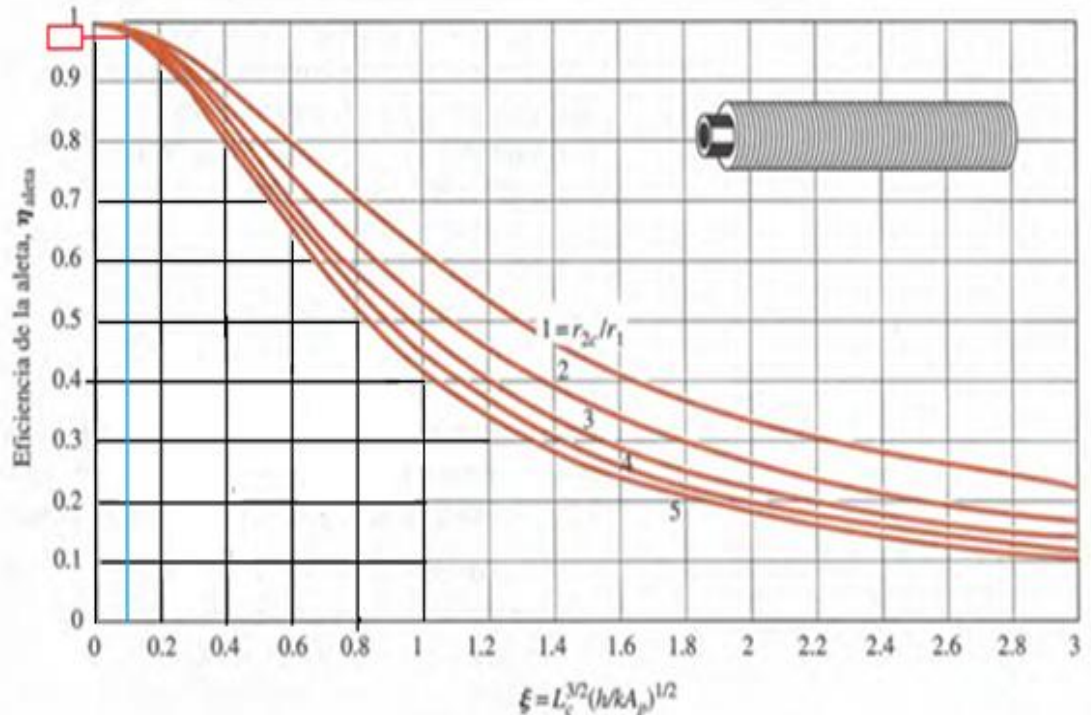


Figura 25. Eficiencia del tubo aletado

✓ Cálculo de la eficiencia mediante fórmula matemática (ver Anexo 20)

Para exactitud se comprueba la aproximación con la siguiente ecuación:

$$\eta_f = C_2 \frac{K_1(m * r_1) I_1(m * r_{2c}) - I_1(m * r_1) K_1(m * r_{2c})}{I_0(m * r_1) K_1(m * r_{2c}) + K_0(m * r_1) I_1(m * r_{2c})}$$

Para obtener el dato de la anterior ecuación se establecen los valores de las variables.

En base a información suministrada por el proveedor AV THERMO INGENIERIA SAS se halla  $m$ :

$$m = \sqrt{\frac{2h}{kt}} = \sqrt{\frac{2 * 5 \text{ W/m}^2\text{C}}{209.3 \text{ W/mC} * 4 * 10^{-4} \text{ m}}} = 4.37 * 10^{-3} \text{ m}^{-1}$$

Se calcula  $C_2$  con la siguiente ecuación:



$$C_2 = \frac{2r_1/m}{r_{2c}^2 - r_1^2} = \frac{2 * 6.35 * 10^{-3}m / 4.37 * 10^{-3}m^{-1}}{(0.0237m)^2 - (6.35 * 10^{-3}m)^2} = 5.56 * 10^3$$

Para el cálculo de las variables K e I se trabaja con Excel utilizando las funciones de Bessel

**Tabla 3. Cálculo de las variables K e I**

		variables	resultado
<b>m</b>	4,37E-03	$k_1 * (m * r_1)$	36036,68519
<b>r<sub>1</sub></b>	6,350E-03	$I_1(m * r_{2c})$	5,17845E-05
<b>m * r<sub>1</sub></b>	2,77E-05	$I_1(m * r_1)$	1,38748E-05
<b>r<sub>2c</sub></b>	0,0237	$k_1(m * r_{2c})$	9655,398309
<b>m * r<sub>2c</sub></b>	0,000103569	$I_0(m * r_1)$	1
<b>C<sub>2</sub></b>	5560	$k_0(m * r_1)$	10,60822426

Con los datos adquiridos se obtiene la eficiencia del tubo con aletas:

$$\eta_f = 5560 \frac{(36036.6 * 5.17 * 10^{-5}) - (1.38 * 10^{-5} * 6655.39)}{(1 * 9655.39) + (10.60 * 5.17 * 10^{-5})} = 0.99$$

✓ Transferencia de calor del tubo con aletas

$$A_{con\ aletas} = 2\pi(r_{2c}^2 - r_1^2) = 2\pi((0.0237m)^2 - (6.35 * 10^{-3}m)^2) = 3.275 * 10^{-3}m^2$$

$$\dot{Q}_{con\ aleta} = n_{aleta} * \dot{Q}_{aleta\ maxima} = 0.99(5W/m^2C * 3.275 * 10^{-3}m^2(30^\circ C - 20^\circ C)) = 0.160W$$

✓ Transferencia de calor del tubo sin aletas

$$A_{sin\ aleta} = \pi D_1 S = \pi(0.0127m * 2.7710^{-3}m) = 1.10 * 10^{-4}m^2$$

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{total\ de\ aleta} &= n(\dot{Q}_{con\ aletas} + \dot{Q}_{libre\ de\ aletas}) = 315(0.160W + 5.52 * 10^{-3}W) \\ &= 52.140W \end{aligned}$$

✓ Transferencia de calor total en el tubo

La cantidad de aletas por metro de longitud del tubo son 315 (por especificaciones del proveedor), por lo tanto

$$\dot{Q}_{total\ de\ aleta} = n(\dot{Q}_{con\ aletas} + \dot{Q}_{libre\ de\ aletas}) = 315(0.160W + 5.52 * 10^{-3}W) = 52.140W$$

$$\dot{Q}_{incrementado} = \dot{Q}_{total\ de\ aleta} - \dot{Q}_{sin\ aletas} = 52.140W - 1.994W = 26.14W$$

- ✓ Efectividad total del tubo con aletas

$$E_{total} = \frac{\dot{Q}_{total\ de\ aleta}}{\dot{Q}_{sin\ aleta}} = \frac{52.140W}{1.994W} = 26.14$$

La razón de transferencia de calor de tubo se incrementa en un factor de 26.14 como resultado de la adición de aletas.

Con el análisis del tubo aleteado se consideró la opción de colocar un ventilador para estudiar el comportamiento de su eficiencia, con ello se halla el coeficiente de transferencia de calor natural y forzado.

### 3.2.2. Calculo de coeficiente de convección forzada:

- ✓ Propiedades del aire: (ver Anexo 21)

**Tabla 4. Propiedades del aire**

T	Cp.	K	$\mu$	$\gamma$	Pr	$\rho$	Q
20°C	1007 $\frac{J}{kg\ ^\circ C}$	0.02514 $\frac{W}{m^\circ C}$	1.825*10 <sup>-5</sup> $\frac{Kg}{ms}$	1.516*10 <sup>-5</sup> $\frac{m^2}{s}$	0.7309	1.204 $\frac{Kg}{m^3}$	0.6388 $\frac{m^3}{s}$

- ✓ Obtención de número de Reynolds

$$Re = \frac{VD}{\gamma} = \frac{6.1 \frac{m}{s} * 0.0127m}{1.516 * 10^{-5} \frac{m^2}{s}} = 5.11 * 10^3$$

- ✓ Para determinar el número Nusselt, se utiliza la ecuación de Churchill y Bernstein

$$Nu_{cel} = \frac{hD}{K} = 0.3 + \frac{0.62Re^{1/2}Pr^{1/3}}{(1 + (0.4/Pr)^{2/3})^{1/4}} [1 + (\frac{Re}{282000})^{5/8}]^{4/5}$$

$$Nu = 0.3 + \frac{0.62 * 5.11 * 10^3 \frac{1}{2} 0.7309 \frac{1}{3}}{(1 + (\frac{0.4}{0.7309})^{2/3})^{1/4}} (1 + (\frac{5.11 * 10^3}{282000})^{5/8})^{4/5} = 12.32$$

- ✓ De acuerdo a los datos obtenidos se da valor al coeficiente de transferencia por convección forzada

$$h = \frac{k}{D} Nu = \frac{0.02514 \frac{W}{m^{\circ}C}}{0.0127m} * 12.32 = 24.39 \frac{W}{m^2^{\circ}C}$$

### 3.2.3. Calculo de coeficiente de convección natural

- ✓ Propiedades del aire a temperatura de la película (ver Anexo 21 )

$$T_f = \frac{T_s + T_{\infty}}{2} = \frac{30^{\circ}C + 20^{\circ}C}{2} = 25^{\circ}C$$

**Tabla 5. Propiedades del aire a temperatura de película**

<b>T</b>	<b>K</b>	<b><math>\gamma</math></b>	<b>Pr</b>	<b><math>\beta = \frac{1}{T_f}</math></b>
25°C	0.02551 $\frac{W}{m^{\circ}C}$	1.562 * 10 <sup>-5</sup> $\frac{m^2}{s}$	0.7296	$\frac{1}{298^{\circ}K}$

- ✓ Número de Rayleigh

$$Ra = Gr * Pr = \frac{\delta \beta (T_w - T_{\infty}) s^3}{\gamma^2} * Pr$$

$$Ra = \left( \frac{9.81 m/s^2 \cdot \frac{1}{298^{\circ}K} * (30^{\circ}C - 20^{\circ}C) (2.77 * 10^{-3} m)^3}{(1.562 * 10^{-5} m^2/s)^2} \right) 0.7296 = 7.55 * 10^3$$

- ✓ Determinación de Nusselt en un tubo horizontal

$$Nu = \left( 0.6 + \frac{0.387 R^{1/6}_{as}}{\left( 1 + \left( \frac{0.559}{Pr} \right)^{9/12} \right)^{8/27}} \right)^2$$

$$Nu = \left( 0.6 + \frac{0.387 (7.55 * 10^3)^{1/6}}{\left( 1 + \left( \frac{0.559}{0.7296} \right)^{9/12} \right)^{8/27}} \right)^2 = 5.33$$

- ✓ De acuerdo a los datos obtenidos se da valor al coeficiente de transferencia por convección natural

$$h = \frac{k}{D} Nu = \frac{0.02551 \frac{W}{m^{\circ}C}}{0.0127} * 5.33 = 10.70 \frac{W}{m^2^{\circ}C}$$

### 3.2.4. Cálculo de la convección natural y forzada combinada (ver Anexo 22)

Para obtener el coeficiente de convección combinada, se considera el número de Graetz con la siguiente ecuación [33]:

$$Gz = RePr \frac{D}{L}$$

$$Gz = 5.11 * 10^3 * 0.7309 * \frac{0.0127m}{1m} = 47.43$$

De acuerdo a la siguiente ecuación se estima el número de Nusselt:

$$Nu = 4.69 Re^{0.27} Pr^{0.12} Gz^{0.07} \frac{D^{0.36}}{L}$$

$$Nu = 4.69 * 5.11 * 10^{3*0.27} 0.7309^{0.21} 47.43^{0.07} \frac{0.0127m^{0.36}}{1m} = 11.9$$

Determinación del coeficiente de convección combinado:

$$h_c = \frac{k}{D} * Nu$$

$$h_c = \frac{0.02514 \text{ W/m}^\circ\text{C}}{0.0127m} * 11.29 = 23.69 \text{ W/m}^2 * ^\circ\text{C}$$

### 3.2.5. Cálculo de tubo aletado con coeficiente combinado

Desarrollando el mismo procedimiento anterior, se determinan los valores para la eficiencia del tubo con aleta de acuerdo al coeficiente de transferencia de calor combinado.

- ✓ Transferencia de calor del tubo por un metro de longitud, sin aletas utilizando la Ley de Newton del enfriamiento:

$$\dot{Q} = hA_{sin\ aleta} (T_b - T_\infty)$$

$$\dot{Q} = 23.69 \text{ W/m}^2_c (\pi * 0.0127m * 1m) (30^\circ\text{C} - 20^\circ\text{C})$$

$$\dot{Q}_{sin\ aleta} = 9.45 \text{ W}$$

- ✓ Transferencia de calor con aletas

A continuación se mencionan los valores determinados por las especificaciones del proveedor, como están en la sección 3.2.1. *Cálculos de tubo aletado.*

- Radio corregido  $r_{2c} = 0.0237m$
- Altura corregida  $L_c = 0.0172m$
- $A_p = 6.88 * 10^{-6}m^2$

➤  $\frac{r_{2c}}{r_1} = 3.732$

✓ Calculo de la eficiencia

$$\xi = L_c^{3/2} \sqrt{\frac{h}{kA_p}}$$

Conductividad térmica del aluminio (**k**):  $209.3 \text{ W/m } c$

Coeficiente de transferencia de calor combinado (**h**):  $23.69 \text{ W/m}^2 c$

Altura corregida de la aleta  $L_c: 0.0172m$

$A_p: 6.88 * 10^{-6}m^2$

Reemplazando la ecuación se obtiene

$$\xi = L_c^{3/2} \sqrt{\frac{h}{KA_p}} = 0.0172 \text{ m}^{3/2} \sqrt{\frac{23.69 \text{ W/m}^2 c}{209.3 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 c} * 6.88 * 10^{-6} m^2}} = 0.289$$

De acuerdo a la Figura 26 de aletas circulares, se valida que la eficiencia es de  $91\% \approx 0.91$  aproximadamente.

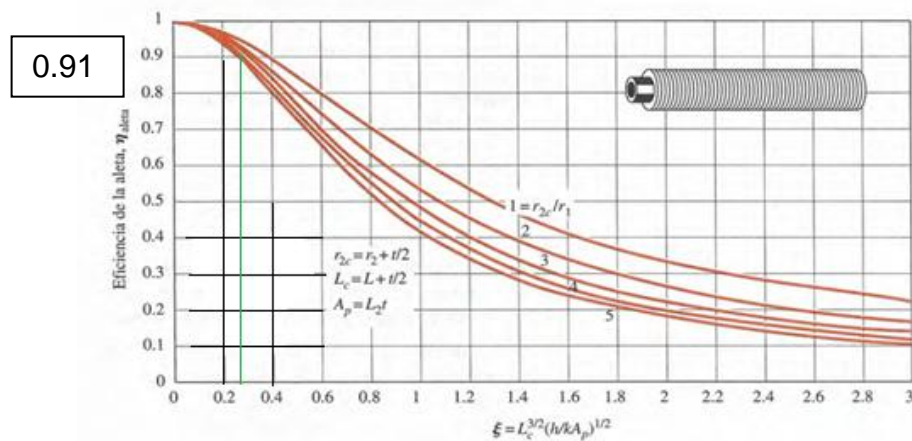


Figura 26. Eficiencia del tubo aletado con coeficiente combinado [28].

✓ Cálculo de la eficiencia mediante fórmula matemática

Para exactitud se comprueba la aproximación con la siguiente ecuación:

$$\eta_f = C_2 \frac{K_1(m * r_1) I_1(m * r_{2c}) - I_1(m * r_1) K_1(m * r_{2c})}{I_0(m * r_1) K_1(m * r_{2c}) + K_0(m * r_1) I_1(m * r_{2c})}$$

Para obtener el dato de la anterior ecuación se establecen los valores de las variables.

En base a información suministrada por el proveedor se halla ***m***:

$$m = \sqrt{\frac{2h}{kt}} = \sqrt{\frac{2 * 23.69 \text{ W/m}^2\text{C}}{209.3 \text{ W/m}^\circ\text{C} * 4 * 10^{-4} \text{ m}}} = 23.80 \text{ m}^{-1}$$

Se calcula ***C<sub>2</sub>*** con la siguiente ecuación:

$$C_2 = \frac{2r_1/m}{r_{2c}^2 - r_1^2} = \frac{2 * 6.35 * 10^{-3} \text{ m} / 23.80 \text{ m}^{-1}}{(0.0237 \text{ m})^2 - (6.35 * 10^{-3} \text{ m})^2} = 1.023$$

Para el cálculo de las variables K e I se trabaja con Excel utilizando las funciones de Bessel

Tabla 6. Cálculo de las variables K e I con coeficiente combinado

$m$	2,38E+01
$r_1$	6,350E-03
$m * r_1$	1,51E-01
$r_{2c}$	0,0237
$m * r_{2c}$	0,56406
$C_2$	1,023

variables	resultado
$k_1 * (m * r_1)$	6,426785238
$I_1(m * r_{2c})$	0,293396144
$I_1(m * r_1)$	0,075780946
$k_1(m * r_{2c})$	1,415564785
$I_0(m * r_1)$	1,005718222
$k_0(m * r_1)$	2,022736869

Con los datos adquiridos se obtiene la eficiencia del tubo con aletas:

$$\eta_f = 1.023 \frac{(6.4267 * 0.2933) - (0.0757 * 1.4155)}{(1.0057 * 1.4155) + (2.0227 * 0.2933)} = 0.90$$

✓ Transferencia de calor del tubo con aletas

$$A_{con\ aletas} = 2\pi(r_{2c}^2 - r_1^2) = 2\pi((0.0237m)^2 - (6.35 * 10^{-3}m)^2) = 3.275 * 10^{-3}m^2$$

$$\dot{Q}_{con\ aleta} = n_{aleta} * \dot{Q}_{aleta\ maxima} = 0.90(23.69 \text{ W/m}^2\text{C} * 3.275 * 10^{-3}m^2(30^\circ\text{C} - 20^\circ\text{C})) = 0.69W$$

✓ Transferencia de calor del tubo sin aletas

$$A_{sin\ aleta} = \pi D_1 S = \pi(0.0127m * 2.7710^{-3}m) = 1.10 * 10^{-4}m^2$$

$$\dot{Q}_{libre\ de\ aletas} = hA_{area\ sin\ aletas}(T_b - T_\infty) = 23.69 \text{ W/m}^2\text{C} * 1.10 * 10^{-4}m^2(30^\circ\text{C} - 20^\circ\text{C}) = 0.026W$$

✓ Transferencia de calor total en el tubo

La cantidad de aletas por metro de longitud del tubo son 315 (por especificaciones del proveedor), por lo tanto

$$\dot{Q}_{total\ de\ aleta} = n(\dot{Q}_{con\ aletas} + \dot{Q}_{libre\ de\ aletas}) + 315(0.69w + 0.026w) = 225.54W$$

$$\dot{Q}_{incrementado} = \dot{Q}_{total\ de\ aleta} - \dot{Q}_{sin\ aletas} = 225.541w - 9.45w = 216.09W$$

✓ Efectividad total del tubo con aletas

$$E_{total} = \frac{\dot{Q}_{total\ de\ aleta}}{\dot{Q}_{sin\ aleta}} = \frac{225.54w}{9.45w} = 23.86$$

La razón de transferencia de calor de tubo se incrementa en un factor de 23.86 como resultado de la adición de aletas.

### 3.3. Cálculo de Radiador

El radiador, es un intercambiador de dos corrientes en flujo cruzado. Las corrientes calientes pueden fluir por el interior de los tubos de un haz y la corriente fría puede hacerlo a través del haz en una dirección generalmente perpendicular a los tubos.

Maneja aletas y tubos, las aletas son horizontales o verticales, este tipo de intercambiador de calor, tiene mayor superficie de aletas y por lo tanto genera más capacidad de enfriamiento.

Para que sea óptimo el diseño se requieren de unas variables como: transferencia de calor que va a transmitir, escoger una configuración en este caso (contracorriente), seleccionar la geometría de las superficies, calcular dimensiones y efectividad del intercambiador de calor.

Con una toma acertada de las variables anteriormente mencionadas, se busca un bajo costo económico, una efectividad alta y un fácil mantenimiento.

#### 3.3.1. Parámetros del diseño de radiador:

La temperatura de entrada del agua al radiador es de  $46^{\circ}\text{C}$ , la temperatura a la que se desea llegar es la temperatura ambiente en este caso  $18^{\circ}\text{C}$ , basados en los datos que se poseen, se utiliza la tabla de propiedades físicas del agua líquida a presión atmosférica, en donde se suma la entrada y salida de temperatura de agua y se realiza una iteración,  $(46^{\circ}\text{C} + 18^{\circ}\text{C})/2 = 64^{\circ}\text{C}/2 = 32^{\circ}\text{C}$

✓ Los valores de la iteración a temperatura de  $32^{\circ}\text{C}$  tiene los siguientes resultados:

$$\begin{aligned} T &= 32^{\circ}\text{C} \\ \rho &= 995.44 \text{ kg/m}^3 \\ c_p &= 4.1746 \text{ KJ/Kg.K} \\ \mu \cdot 10^6 &= 766.4 \text{ N.s/m}^2 \\ k &= 619.04 \text{ W/m.K} \\ Pr &= 5.1704 \end{aligned}$$



**Tabla 7. Propiedades físicas del agua líquida [34].**

T (°C)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$c_p$ (kJ/kg·K)	$\mu \cdot 10^6$ (N·s/m <sup>2</sup> )	$\nu \cdot 10^6$ (m <sup>2</sup> /s)	$k \cdot 10^3$ (W/m·K)	$\alpha \cdot 10^6$ (m <sup>2</sup> /s)	$\beta \cdot 10^3$ (1/K)	Pr
0.001	1005	4.213	1766	1.757	567.2	0.1339	-0.08021	13.12
5	1004	4.201	1506	1.500	574.8	0.1363	0.01135	11.00
10	1003	4.191	1300	1.297	583.0	0.1387	0.08744	9.348
15	1001	4.184	1135	1.134	591.4	0.1412	0.15230	8.033
20	999.5	4.180	1001	1.001	599.8	0.1436	0.20900	6.975
25	997.9	4.176	890.1	0.8920	608.0	0.1459	0.25940	6.114
30	996.2	4.175	797.6	0.8007	616.0	0.1481	0.3051	5.406
35	994.3	4.174	719.6	0.7238	623.6	0.1503	0.3470	4.817
40	992.4	4.174	653.3	0.6583	630.7	0.1523	0.3859	4.323
45	990.3	4.175	596.3	0.6022	637.4	0.1542	0.4225	3.906
50	988.1	4.177	547.1	0.5537	643.6	0.1559	0.4572	3.551
55	985.7	4.179	504.2	0.5115	649.3	0.1576	0.4903	3.245
60	983.2	4.182	466.6	0.4746	654.4	0.1592	0.5221	2.981
65	980.6	4.184	433.5	0.4420	659.1	0.1606	0.5528	2.752
70	977.9	4.188	404.1	0.4132	663.2	0.1620	0.5827	2.551
75	975.0	4.191	378.0	0.3877	666.9	0.1632	0.6118	2.375
80	971.9	4.195	354.6	0.3648	670.2	0.1644	0.6402	2.219
85	968.8	4.199	333.6	0.3443	673.0	0.1654	0.6682	2.081
90	965.5	4.204	314.6	0.3259	675.5	0.1664	0.6958	1.958
95	962.1	4.209	297.5	0.3092	677.5	0.1673	0.7230	1.848
100	958.5	4.214	281.9	0.2941	679.3	0.1682	0.7501	1.749

Fuente: S.A. Klein y F.L. Alvarado, "Engineering Equation Solver Software (EES)", Academia Versión 6.271 (20-07-2001).

La temperatura de aire en el ambiente se tomó respecto al pronóstico del tiempo y la temperatura de salida del aire respecto al calor extraído en el intercambiador de calor (radiador), con base en estos datos, se utiliza la tabla de propiedades físicas del aire seco, donde se suma la entrada de aire a temperatura ambiente y la salida de aire después del radiador, se itera  $(16^\circ\text{C} + 40^\circ\text{C}) = 56^\circ\text{C}/2 = 28^\circ\text{C}$

- ✓ Los valores de la iteración del aire a temperatura de  $28^\circ\text{C}$ , tiene los siguientes resultados:

$$\begin{aligned}
 T &= 28^\circ\text{C} \\
 \rho &= 1.172 \text{ Kg}/\text{m}^3 \\
 c_p &= 1.007 \text{ KJ}/\text{Kg} \cdot \text{K} \\
 \mu \cdot 10^6 &= 18.628 \text{ N} \cdot \text{s}/\text{m}^2 \\
 \nu &= 15.892 \text{ m}^2/\text{s} \\
 k &= 25.732 \text{ W}/\text{m} \cdot \text{K} \\
 Pr &= 0.72876
 \end{aligned}$$

**Tabla 8. Propiedades físicas del aire seco [35].**

T (°C)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$c_p$ (kJ/kg·K)	$\mu \cdot 10^6$ (N·s/m <sup>2</sup> )	$\nu \cdot 10^6$ (m <sup>2</sup> /s)	$k \cdot 10^3$ (W/m·K)	$\alpha \cdot 10^6$ (m <sup>2</sup> /s)	Pr
-150	2.867	0.9825	8.636	3.013	11.71	4.157	0.7246
-100	2.039	0.9656	11.9	5.835	15.82	8.034	0.7263
-90	1.927	0.9753	12.49	6.482	16.62	8.842	0.733
-80	1.828	0.9835	13.07	7.153	17.42	9.692	0.7381
-70	1.738	0.9901	13.64	7.85	18.22	10.59	0.7414
-60	1.656	0.9952	14.2	8.572	19.01	11.53	0.7433
-50	1.582	0.999	14.74	9.317	19.79	12.52	0.744
-40	1.514	1.002	15.27	10.08	20.57	13.56	0.7436
-30	1.452	1.004	15.79	10.88	21.34	14.65	0.7425
-20	1.394	1.005	16.3	11.69	22.11	15.78	0.7408
-10	1.341	1.006	16.8	12.52	22.88	16.96	0.7387
0	1.292	1.006	17.29	13.38	23.64	18.17	0.7362
5	1.269	1.006	17.54	13.82	24.01	18.8	0.735
10	1.247	1.006	17.78	14.26	24.39	19.44	0.7336
15	1.225	1.007	18.02	14.71	24.76	20.08	0.7323
20	1.204	1.007	18.25	15.16	25.14	20.74	0.7309
25	1.184	1.007	18.49	15.61	25.51	21.4	0.7296
30	1.164	1.007	18.72	16.08	25.88	22.08	0.7282
35	1.146	1.007	18.95	16.54	26.25	22.76	0.7268
40	1.117	1.007	19.18	17.02	26.62	23.45	0.7255
45	1.11	1.007	19.41	17.49	26.99	24.16	0.7241
50	1.092	1.007	19.63	17.97	27.35	24.87	0.7228

### 3.3.2. Cálculo del área del radiador

Los tubos y las aletas hacen parte del intercambiador de calor (radiador), este cálculo se tomó con base en el radiador de un vehículo Ford.



**Figura 27. Radiador de vehículo Ford**

✓ Cálculo de área del tubo

La longitud se tomó respecto a la medición del panel del radiador escogido.

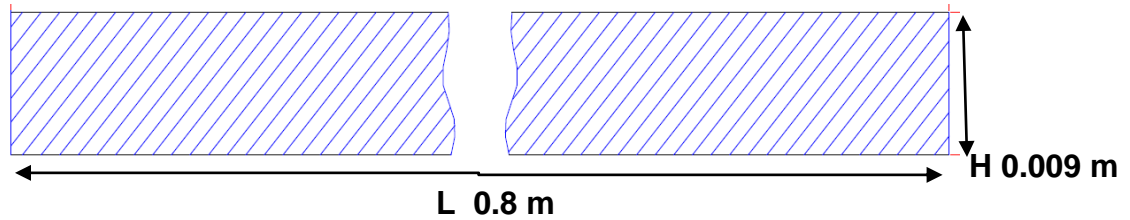


Figura 28. Dimensiones del tubo del radiador

$$A_1 = L \cdot H$$

$$A_1 = 0.8m \cdot 0.009m$$

$$A_1 = 7.2 \times 10^{-3} m^2$$

*H*: altura de las aletas

*L*: Longitud

✓ Cálculo de área de aleta

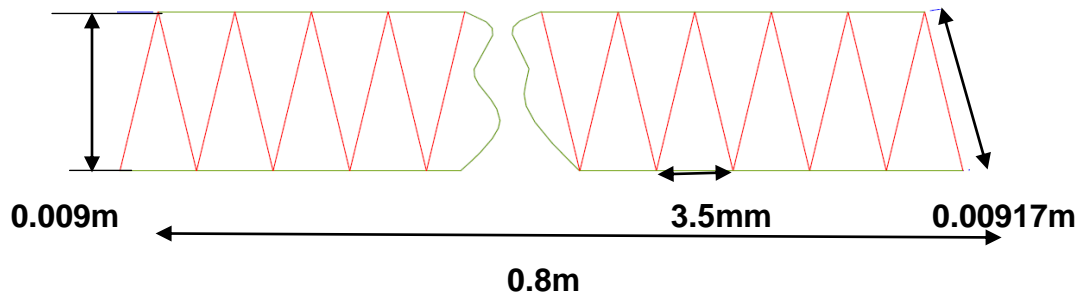


Figura 29. Dimensiones de las aletas



Figura 30. Aletas de forma triangular

$$A_2 = Z \cdot X \cdot e$$

$$A_2 = 160 \cdot 0.00917m \cdot 4 \times 10^{-4} m^2$$

$$A_2 = 5.8688 \times 10^{-4} m^2$$

*Z*: Número de triángulos (aletas) por 0.80 m – 160

*X*: Inclínación del triángulo de la aleta 0.00917m

*e*: Espesor de la aleta  $4 \times 10^{-4} m^2$

$$\begin{aligned}
 &\text{Área Total} \\
 &A_T = (A_1 - A_2) * N_a \\
 &A_T = (7.2 \times 10^{-3} m^2 - 5.8688 \times 10^{-4} m^2) * 44 \\
 &A_T = 0.2909 m^2
 \end{aligned}$$

$N_a$ : Número de aletas de radiador 44 (Según el radiador escogido)

Para el cálculo del caudal de líquido de refrigeración, en este caso agua, y basándose en la toma de datos en el intercambiador coraza-tubos, la prueba arroja los siguientes datos:

$C_a$ : Caudal del líquido de refrigeración  $(30 \text{ L/min}) (0.0005 m^3/s)$

### 3.3.3. Calculo de densidad del líquido

$$V_a = \frac{C_a}{A_{ti}}$$

$V_a$ : Velocidad del líquido de refrigeración

$A_{ti}$ : Área transversal de ingreso al intercambiador de calor (radiador)










$D$ : diámetro de la toma de ingreso al intercambiador de calor (radiador)  $\frac{1}{2}$  tubería 0.0127m

$$\begin{aligned}
 A_{ti} &= \frac{\pi * D^2}{2} \\
 A_{ti} &= \frac{\pi * (0.0127m)^2}{2} \\
 A_{ti} &= 0.0002533 m^2
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 V_a &= \frac{C_a}{A_{ti}} \\
 V_a &= \frac{0.0005 m^3/s}{0.0002533 m^2} \\
 V_a &= 1.97 m/s
 \end{aligned}$$

Con los cálculos anteriores se procede a la determinación del coeficiente de convección de aire, se determina el tipo de aleta, en este caso es triangular (ver Figura 31).

Números de Nusselt y factores de fricción para flujo laminar con desarrollado en tubos de diferente sección transversal

Sección transversal	$\frac{b}{a}$	$Nu_D \equiv \frac{hD_h}{k}$	
		$(q_s'' \text{ uniforme})$	$(T_s \text{ uniforme})$
	—	4.36	3.66
	1.0	3.61	2.98
	1.43	3.73	3.08
	2.0	4.12	3.39
	3.0	4.79	3.96
	4.0	5.33	4.44
	8.0	6.49	5.60
	$\infty$	8.23	7.54
	—	3.11	2.47

Usada con permiso de W. M. Kays y M. E. Crawford, *Convective Heat and Mass Transfer*, McGraw-Hill, N.Y.

**Figura 31. Número de Nusselt y factor de fricción para flujo laminar [36]**

Para el cálculo del coeficiente de convección de aire, es importante conocer datos como la conductividad térmica del aire y el material de la aleta (ver Tabla 9).

**Tabla 9. Propiedades térmicas de materiales de construcción y aislantes [37].**

Material	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	Calor específico (J/(kg·K))	Conductividad térmica (W/(m·K))	Difusividad térmica (m <sup>2</sup> /s) (x10 <sup>-6</sup> )
Acero	7850	460	47-58	13,01-16,06
Agua	1000	4186	0,58	0,139
Aire	1,2	1000	0,026	21,67
Alpaca	8,72	398	29,1	8384,8
Aluminio	2700	909	209-232	85,16-94,53
Amianto	383-400	816	0,078-0,113	0,250-0,346
Arcilla refractaria	2000	879	0,46	0,261
Arena húmeda	1640	-	1,13	-
Arena seca	1400	795	0,33-0,58	0,296-0,521
Asfalto	2120	1700	0,74-0,76	0,205-0,211
Baldosas cerámicas	1750	-	0,81	-
Baquelita	1270	900	0,233	0,201
Bitumen asfáltico	1000	-	0,198	-
Bloques cerámicos	730	-	0,37	-
Bronce	8000	360	116-186	40,28-64,58
Carbón (antracita)	1370	1260	0,238	0,139
Cartón	-	-	0,14-0,35	-
Cemento (duro)	-	-	1,047	-
Cinc	7140	389	106-140	38,16-50,41
Cobre	8900	389	372-385	107,45-111,20
Corcho (expandido)	120	-	0,036	-

### 3.3.4. Diámetro hidráulico de la aleta

$$D_H = \frac{4(a_t)}{P}$$

$$D_H = \frac{4 * \left( \frac{0.0035m * 0.009m}{2} \right)}{2 * (0.00917m + 0.0035m)}$$

$$D_H = 2.8846 \times 10^{-3}m$$

$a_t$ : área total

*P: perímetro aleta*

#### 3.3.4.1. Calculo de número de Reynolds para el aire

Ahora se determina el número de Reynolds para el aire, donde la velocidad es de  $6.1 \text{ m/s}$  y la viscosidad cinemática es de  $15.892 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$

$$Re = \frac{VD_H}{\nu}$$

$$Re_{\text{aire}} = \frac{6.1 \text{ m/s} * 2.8846 \times 10^{-3} \text{ m}}{15.892 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}}$$

$$Re_{\text{aire}} = 1107.22$$

*$Re$ : Numero de Reynolds*

*$V$ : Velocidad del aire hecha por el ventilador*

*$D_H$ : Diametro hidraulico de la aleta*

*$\nu$ : viscosidad cinematica*

Como el número de Reynolds del aire es menor de 2000, este es un flujo laminar.

✓ Calculo del coeficiente de convección del aire de refrigeración

$$h_r = \frac{Nu_D * k}{D_H}$$
$$h_r = \frac{3.11 * 0.026 \text{ w/m } ^\circ\text{C}}{2.8846 \times 10^{-3} \text{ m}}$$

$$h_r = 32.52 \text{ w/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Donde:

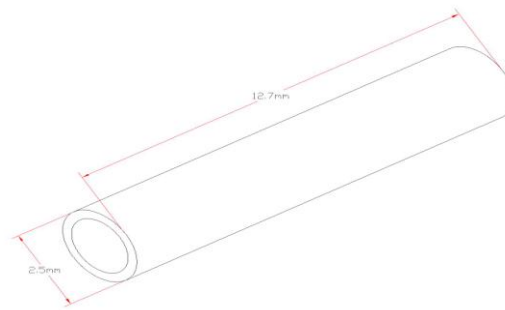
*$Nu_D$ : Numero de Nusselt*

*$k$ : conductividad termica aire*

*$D_h$ : diametro hidraulico*

#### 3.3.5. Diámetro hidráulico del tubo

Se tiene en cuenta la geometría del tubo, para hallar el diámetro hidráulico.



**Figura 32. Geometría del tubo**



**Figura 33. Panel del radiador**

***a:*** 2.5mm — — 0.0025m

***b:*** 12.7mm — — 0.0127m

***#<sub>tubos</sub>*** — — 86

$$D_H = \frac{4 (a_t)}{p}$$

$$D_H = \frac{4 * (0.0127m * 2.5 \times 10^{-3}m)}{2 * (0.0127m + 2.5 \times 10^{-3}m)}$$

$$D_H = 0.004m \text{ (Solo para un tubo)}$$

$$D_H = 0.004m * 86$$

$$D_H = 0.359m$$

### 3.3.5.1. Calculo de número de Reynolds para el agua

Luego de encontrar el diámetro hidráulico del tubo, se halla el número de Reynolds para el agua.



$$Re = \frac{\rho V D}{\mu}$$

$$Re_{agua} = \frac{995.44 \frac{kg}{m^3} * 1.97 \frac{m}{s} * 0.004 m}{766.4 \times 10^{-6} \frac{N \cdot s}{m^2}}$$

$$Re_{agua} = 10234.95$$

*Re: Numero de Reynolds*

*V: Velocidad del agua*

*D: Diametro hidraulico del tubo de agua*

*μ: viscosidad dinamica*

*ρ: Densidad del agua*

Como el número de Reynolds es mayor de 4000, es un flujo turbulento para el agua, con lo anteriormente calculado se procede a encontrar el número de Prandtl.

✓ Calculo del factor de corrección.

$$Pr = \frac{\mu * C_p}{k}$$

$$Pr = \frac{766.4 \times 10^{-6} \frac{N \cdot s}{m^2} * 4174.6 \frac{J}{Kg \text{ } ^\circ C}}{0.58 \frac{W}{m \text{ } ^\circ C}}$$

$$Pr = 5.51$$

*Pr: numero de Prandtl*

*μ: Viscosidad dinamica*

*C<sub>p</sub>: Capacidad calorifica a presion constante*

*k: Conductividad termica*

Se calcula el factor de corrección.

$$f = (0.790 \ln Re - 1.64)^{-2}$$

$$f = (0.790 \ln(10234.95) - 1.64)^{-2}$$

$$f = 0.031$$

✓ Se procede a hallar el  $Nu_D$  con factor de corrección, para flujo turbulento en conductos suaves.

$$Nu_D = \frac{\left(\frac{f}{8}\right) (Re - 1000) P_r}{1 + 1.27 \left(\frac{f}{8}\right)^{0.5} (Pr^{2/3} - 1)}$$

$$Nu_D = \frac{\left(\frac{0.031}{8}\right) (10234.95 - 1000) (5.51)}{1 + 1.27 \left(\frac{0.031}{8}\right)^{0.5} (5.51^{2/3} - 1)}$$

$$Nu_D = 73,69$$

$Nu_D$ : Numero de Nusselt

$f$ : Factor de corrección

$Re$ : Número de Reynolds

$P_r$ : Número de Prandtl

✓ Calculo del coeficiente de convección para el agua de refrigeración

$$h_a = \frac{Nu_D * k}{D_H}$$

$$h_a = \frac{73.69 * 0.58 \text{ W/m } ^\circ\text{C}}{0.359 \text{ m}}$$

$$h_a = 118.96 \text{ W/m}^2\text{ }^\circ\text{C}$$

$Nu_D$ : Numero de Nusselt

$K$ : conductividad termica agua

$D_H$ : Diametro hiraulico

### 3.3.6. Calculo del coeficiente global de transferencia de calor

Donde:

$e$ : espesor de la pared del tubo

$K_a$ : conductividad térmica del aluminio

$h_a$ : coeficiente de convección para el agua

$h_r$ : Coeficiente de convección para el aire

$A_{FC}$ : Área de contacto del fluido caliente

$A_{ff}$ : Área de contacto del fluido frio

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_a} + \frac{A_{FC}}{h_r * A_{ff}} + \frac{e}{K_a}}$$

✓ Área de contacto del fluido caliente

$$A_{FC} = [[(\pi * b) + (2 * b) + 2(a + b)] * \#tubos * L]$$

$$A_{FC} = [(\pi * 0.002m) + (2 * 0.002m) + 2(0.0105m + 0.002m)] * 86 * 0.8m]$$

$$A_{FC} = 6.5840 \text{ m}^2$$

*a*: longitud de cada división de tubo

*b*: altura de cada división de tubo

✓ Área de contacto con el fluido frio

$$A_{ff} = \left[ 2[2f + C] * \frac{L}{C} * \#Aletas * Aa \right]$$

$$A_{ff} = \left[ 2 [2(0.00917m) + 0.0035] * \frac{0.8m}{0.0035m} * 44 * 0.031m \right]$$

$$A_{ff} = 13.61 \text{ m}^2$$

*f*: altura inclinada de la aleta

*C*: longitud de base de la aleta

*A<sub>a</sub>*: Ancho de la aleta

$$U = \frac{1}{\frac{1}{118.96 \text{ W/m}^2 \cdot \text{C}} + \frac{6.5840 \text{ m}^2}{(32.52 \text{ W/m}^2 \cdot \text{C} * 13.61 \text{ m}^2)} + \frac{0.00025m}{232 \text{ W/m}^2 \cdot \text{C}}}$$

$$U = 42.96 \text{ W/m}^2 \cdot \text{C}$$

El valor del coeficiente de transferencia de calor, está dentro del parámetro del tipo de intercambiador de agua hacia aire en tubos con aletas.

**Tabla 10. Valores representativos de los coeficientes totales de transferencia de calor en los intercambiadores de calor [28].**

Tipo de intercambiador de calor	$U$ , $W/m^2 \cdot ^\circ C^*$
Agua hacia agua	850-1 700
Agua hacia aceite	100-350
Agua hacia gasolina o queroseno	300-1 000
Calentadores de agua de alimentación	1 000-8 500
Vapor de agua hacia combustóleo ligero	200-400
Vapor de agua hacia combustóleo pesado	50-200
Condensador de vapor de agua	1 000-6 000
Condensador de freón (agua enfriada)	300-1 000
Condensador de amoniaco (agua enfriada)	800-1 400
Condensadores de alcohol (agua enfriada)	250-700
Gas hacia gas	10-40
Agua hacia aire en tubos con aletas (agua en los tubos)	30-60 <sup>†</sup> 400-850 <sup>†</sup>
Vapor de agua hacia aire en tubos con aletas (vapor de agua en los tubos)	30-300 <sup>†</sup> 400-4 000 <sup>†</sup>

- ✓ La razón de la transferencia de calor del agua caliente al aire se determina con relación en el balance de energía en el flujo de agua.

$$\begin{aligned}\dot{Q} &= \dot{m}_a * c_{pa} (t_1 - t_2) \\ \dot{Q} &= 0.49772 \frac{Kg}{s} * 4174.6 \frac{J}{Kg^\circ C} * (46^\circ C - 18^\circ C) \\ \dot{Q} &= 58177.89 W\end{aligned}$$

El área de transferencia de calor de los tubos, es el área superficial total.

$$\begin{aligned}A_i &= n_t \pi D_i L \\ A_i &= (92) \pi * (0.005m) * (0.80m) \\ A_i &= 1.156 m^2\end{aligned}$$

Conociendo la razón de transferencia de calor y área superficial, se define el coeficiente de calor interno total

$$\begin{aligned}\dot{Q} &= U_i A_i F \Delta T_{ml,CF} \\ U_i &= \frac{\dot{Q}}{A_i F \Delta T_{ml,CF}}\end{aligned}$$

Donde:

$U_i$ : Coeficiente de calor interno total

$\dot{Q}$ : razón de transferencia de calor

$A_i$ : área superficial total

$F$ : Factor de corrección

$\Delta T_{ml,CF}$ : media logarítmica de temperatura

La media logarítmica de temperatura (MLDT contracorriente) es:

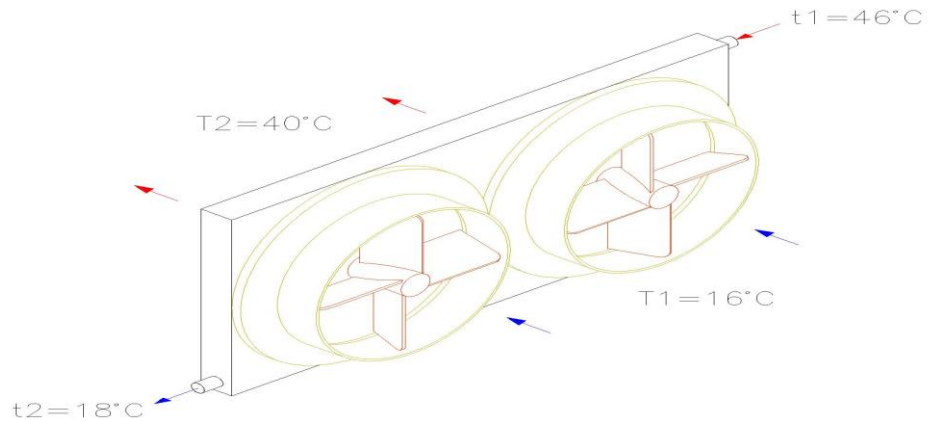


Figura 34. Cálculo para la media logarítmica en el radiador

$$\Delta_{th} = T_1 - t_2$$

$$\Delta_{th} = 16^\circ \text{C} - 18^\circ \text{C}$$

$$\Delta_{th} = -2^\circ \text{C}$$

$$\Delta_{tc} = T_2 - t_1$$

$$\Delta_{tc} = 40^\circ \text{C} - 46^\circ \text{C}$$

$$\Delta_{tc} = -6^\circ \text{C}$$

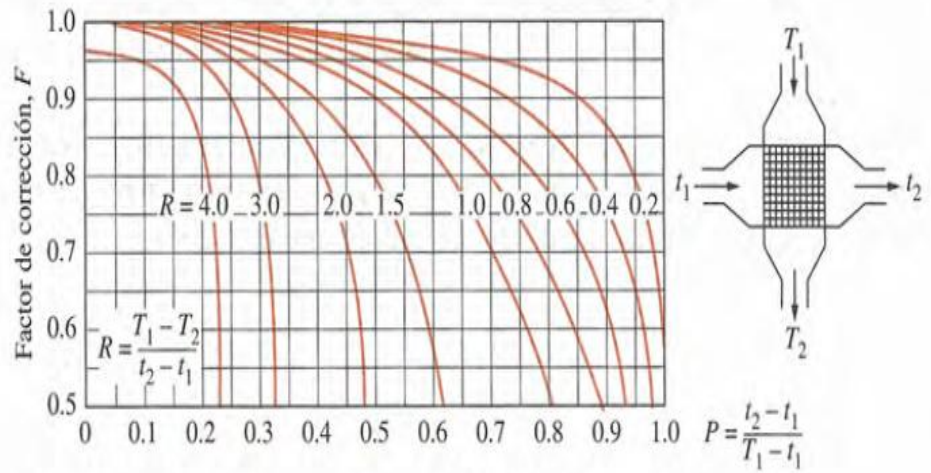
$$\Delta_{Tml,CF} = \frac{\Delta_{th} - \Delta_{tc}}{L_n \frac{\Delta_{tc}}{\Delta_{th}}}$$

$$\Delta_{Tml,CF} = \frac{-2^\circ \text{C} - (-6^\circ \text{C})}{L_n \frac{-6^\circ \text{C}}{-2^\circ \text{C}}}$$

$$\Delta_{Tml,CF} = 3.6409^\circ \text{C}$$

$$P = \frac{t_2 - t_1}{T_1 - t_1} = \frac{18 - 46}{16 - 46} = 0.93$$

$$R = \frac{T_1 - T_2}{t_2 - t_1} = \frac{16 - 40}{18 - 46} = 0.86$$



$$F = 0.98$$

Figura 35. Flujo cruzado de un solo pasó con los dos fluidos de flujo no mezclados [28].

Donde F es el factor de corrección, se sustituyen los valores y el coeficiente total de transferencia de calor interna es (ver Figura 35):

$$U_i = \frac{58177.89 \text{ W}}{1.156 \text{ m}^2 * 0.98 * 3.6409 \text{ } ^\circ\text{C}}$$

$$U_i = 14104.75 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

### 3.3.7. Dimensiones del radiador

El tamaño físico del radiador, depende del área de transferencia de calor, ya que si la necesidad de transferencia de calor es mayor, el tamaño físico del radiador acrecentara.

El ancho del radiador es la parte de entrada del aire, el ancho de los tubos y se suma el saliente de la placa de los porta tubos.

$$\begin{aligned} M &= A + 2S \\ M &= (0.0268\text{m} + 2(0.005\text{m})) \\ M &= 0.0368 \text{ m} \end{aligned}$$

**A:** ancho total del tubo (0.0268m)

**S:** Saliente de la placa porta tubos (0.005m)

La altura del radiador se relaciona el número de tubos y aletas, la altura del tubo y las salientes de la placa porta tubos.

$$H = [(a * Nt) + (c' * \#aletas) + (2 * S)]$$

$$H = [(0.0025m * 43) + (0.009m * 44) + (2 * 0.005m)]$$

$$H = 0.521 m$$

*a*: altura exterior de cada tubo (0.0025m)

*N<sub>t</sub>*: número tubos (43)

*C'*: Altura de la aleta (0.009m)

#*aletas* 44

*S*: saliente de la placa porta tubos (0.005m)

La Longitud del radiador es la misma longitud de las aletas y se basa en el área de transferencia de calor que se necesita, la longitud radiador en este caso es 0.8 m.

✓ Efectividad del radiador

$$\epsilon = \frac{\dot{Q}}{\dot{Q}_{Max}}$$

$$\epsilon = \frac{\text{Razón de la transferencia de calor real}}{\text{Razón maxima posible de transferencia de calor}}$$

$$\epsilon = \frac{\dot{m}_a * c_{pa} (t_1 - t_2)}{\dot{m}_r * c_{pr} (t_1 - T_1)}$$

$$\epsilon = \frac{0.49772 \frac{Kg}{s} * 4174.6 \frac{J}{Kg^{\circ}C} * (46^{\circ}C - 18^{\circ}C)}{2.2691 \frac{Kg}{s} * 1007 \frac{J}{Kg^{\circ}C} * (46^{\circ}C - 16^{\circ}C)}$$

$$\epsilon = 0,8486$$

$$\epsilon = 85 \%$$

✓ Determinación de NUT

Es la relación de capacidad, donde el C máximo es para el fluido mezclado y el C mínimo es para el fluido no mezclado (ver Figura 36).

$$C = \frac{C \text{ mínimo}}{C \text{ máximo}}$$

$$C = \frac{2.2691 \frac{kg}{s} * 1007 \frac{J}{kg^{\circ}C}}{0.49772 \frac{kg}{s} * 4174.6 \frac{J}{kg^{\circ}C}}$$

$$C = 1.00$$

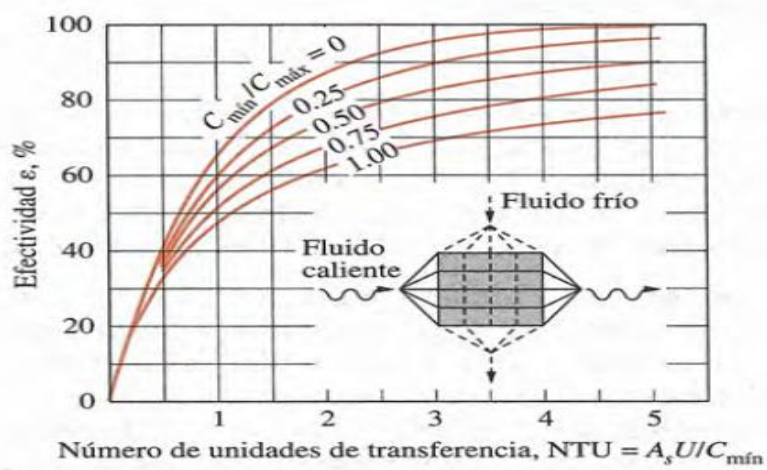


Figura 36. Flujo cruzado con los fluidos no mezclados [28].

✓ Comprobación de salida de temperatura del intercambiador de calor (radiador)

Para la temperatura de salida del radiador se utiliza la siguiente ecuación:

$$q = m_a * C_p (T_1 - T_2)$$

$$T_2 = T_1 - \left( \frac{q}{m_a * C_p} \right)$$

$$T_2 = 46 - \left( \frac{58177.89}{0,49772 * 4174.6} \right)$$

$$T_2 = 18^{\circ}\text{C}$$

La caída de presión en el aire de refrigeración sirve para establecer la potencia del ventilador.

$$\Delta_P = F_r \delta_r V_r \frac{b}{D_H}$$

$$f_r R_e = 53$$

$$f_r = \frac{53}{1196.20}$$

$$f_r = 0.04430$$

$$\Delta_P = 0.04430 * 1.184 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} * 6.1 \text{ m/s} * \left( \frac{0.0127 \text{ m}}{2.8846 \times 10^{-3} \text{ m}} \right)$$

$$\Delta_P = 1.4086 \text{ N/m}^2$$

$f_r$ : Factor de fricción para sección triangular

$\delta_r$ : Densidad del aire

$V_r$ : Velocidad del aire



$b$ : ancho de tubo de agua

$D_h$ : Diametro hidraulico para una sección rectangular

✓ Para calcular la potencia del ventilador de aire se utiliza la siguiente ecuación

$$\dot{W} = 0.1175 * Q * h$$

$$\dot{Q} = \frac{\dot{m}_r}{\delta \cdot 16^\circ C}$$

$$\dot{Q} = \frac{2.3194 \frac{Kg}{s}}{1007 \frac{Kg}{m^3}}$$

$$\dot{Q} = 1.8933 \frac{m^3}{s}$$

$$\dot{Q} = 66.86 \frac{ft^3}{min}$$

$\dot{W}$ : Potencia en watts

$\dot{Q}$ : Caudal de un ventilador

$\dot{m}_r$ : flujo masico del aire

$\delta$ : desidad del aire

La presión estática (h) de **bar** = 0.02 para ventiladores **in H2O** = 8

$$\dot{W} = 0.1175 * 66.86 \frac{ft^3}{min} * 8 \text{ in H2O}$$

$$\dot{W} = 62.48 W$$

El motor escogido es de inducción jaula de ardilla, con velocidad constante, el número de polos de bobinado para el motor eléctrico se determina por el número de fases eléctricas; en este caso se trabaja en la red eléctrica a **110V** por lo que el número de polos serán dos, el cálculo de velocidad de un motor de inducción se determina por:

$R_{pm}$ : Revoluciones por minuto

120: Constante

$F$ : frecuencia de suministro de energia ( $H_z$ )

$p$ : número de polos de bobinado de motor

$$R_{pm} = \frac{(120 \times F)}{p}$$

$$R_{pm} = \frac{120 \times 60 H_z}{2}$$

$$R_{pm} = 3600$$

## **4. SELECCIÓN DEL EQUIPO DE REFRIGERACIÓN**

En este capítulo se evaluarán los tres equipos de refrigeración calculados anteriormente, en la valoración se tienen en cuenta un puntaje para los siguientes ítems; Eficiencia, dimensiones del diseño, mantenimiento, costos, ventajas y desventajas. Finalmente con la mayor puntuación se optara por escoger el equipo de refrigeración.

### **4.1. Selección del sistema**

Para seleccionar el sistema de refrigeración adecuado para la planta ECCI 3 se evalúa los tres casos como tubo aleteado, chiller y radiador. Por medio de seis ítems se evaluarán y se aprobará el sistema que cumpla óptimamente con el objetivo del proyecto. En la Tabla 11 se puede evidenciar que a cada ítem se le dio un porcentaje, un puntaje de 1 a 100 para así lograr tener un valor numérico para la selección.

- ✓ Para el ítem de la eficiencia le correspondió un valor del 25%, la cuarta parte del 100% ya que es de vital importancia para el proyecto tener un sistema que cumpla con la función del refrigerar el agua a la salida de los intercambiadores y
- ✓ pueda mantener constante la temperatura.
- ✓ Para el ítem de dimensiones del diseño le correspondió un valor del 13%, ya que este influye bastante en la selección del sistema, porque se tiene que acoplar a los espacios libres alrededor de la planta que está actualmente y cumplir con las normas de seguridad industrial.
- ✓ Para el ítem de costos le correspondió un valor del 40%, es un factor importante y de cuidado para analizar ya que esta parte trata de inversión de capital para la ejecución de la fabricación del sistema de refrigeración y por lo cual siempre se rige un proyecto a gran escala.
- ✓ Para el ítem de mantenimiento le correspondió un valor del 10% ya que esta parte se evalúa las acciones que se tiene que realizar para mantener el equipo en óptimas condiciones.
- ✓ Para el ítem de ventajas le corresponde un 5% por que se tiene que evaluar los beneficios que aporta cada sistema.
- ✓ Para el ítem de las desventajas le corresponde un 7%, en este se determinan los obstáculos e inconvenientes que se puede presentar en la puesta a punto del sistema .el porcentaje es mayor que las ventajas por que al momento de presentar una falla o falta de capacidad serán determinantes para reemplazar o modificar lo realizado.

**Tabla 11. Selección del sistema**

ITEMS	PORCENTAJE	TUBO ALETADO	CHILLER	RADIADOR
<b>EFICIENCIA</b>	25%	Se obtiene por cálculos una eficiencia del 90%	De acuerdo a los cálculos termodinámicos, el equipo tiene varias opciones para el manejo de refrigerantes que efectúan bien el proceso de enfriamiento	Según los cálculos y la relación de transferencia de calor real y la razón máxima posible de transferencia de calor, la eficiencia es del 87%
PUNTAJE DE 1-100		85	85	100
RESULTADO		21.25	21.25	25
<b>DIMENSIONES DEL DISEÑO</b>	13%	Tubo aletado horizontal que se obtiene del proveedor desde los 0.50m en adelante	El equipo por dimensiones de los serpentines, compresor y ventiladores ocupa un volumen de 0.6m de ancho x 3m largo y 2m alto	El radiador tiene un ancho de 0.0368m, altura 0.557m, longitud de 0.8m
PUNTAJE DE 1-100		90	65	85
RESULTADO		11.7	8.45	11.05
<b>MANTENIMIENTO</b>	10%	La limpieza se realiza con agua a alta presión	Se debe de realizar cambio de refrigerante, limpieza general en serpentines y compresor periódicamente	En el mantenimiento se debe cambiar el agua para expulsar la cavitación existente en el sistema, para que no exista taponamiento del radiador.
PUNTAJE DE 1-100		75	65	100
RESULTADO		7.5	6.5	10
<b>COSTOS</b>	40%	Por metro de longitud tiene un costo de 60.000=+ IVA	Por cada tonelada de refrigeración tiene un costo de 1'700.000=	El costo del panel es de 700.000 pesos, valor de los tanques 250.000 y ventiladores 400.000
PUNTAJE DE 1-100		85	40	90
RESULTADO		34	13	36
<b>VENTAJAS</b>	5%	Maximiza la transferencia de calor	Equipo especializado en refrigeración y enfriamiento de líquidos	De fácil instalación y con ubicación de repuestos
PUNTAJE DE 1-100		90	100	95
RESULTADO		4.5	5	4.75
<b>DESVENTAJAS</b>	7%	Si se aumenta el área de transferencia de calor, aumenta su masa y su costo	Si aumenta la capacidad para enfriamiento, se deben cambiar e instalar nuevos equipos más potentes	Suele averiarse en los puntos en donde la tubería es flexible
PUNTAJE DE 1-100		40	30	50
RESULTADO		2.8	2.1	3.5
<b>RESULTADO TOTAL</b>	100%	<b>81.75</b>	<b>59.3</b>	<b>90.3</b>

Al observar la Tabla 11 se puede evidenciar que el sistema seleccionado es el radiador el cual tiene un puntaje de 90.3% del 100%, este resultado se da al evaluar los tres sistemas y se refleja que:

- ✓ el radiador baja más temperatura del agua que el tubo aletado.
- ✓ con respecto al chiller el radiador es de menor costo y sus dimensiones son más apropiadas para la planta.
- ✓ Por parte del mantenimiento del radiador es más fácil realizarlo que en el chiller y es un poco más tedioso que el tubo aletado.

En conclusión se seleccionó el radiador porque es el sistema con un menor costo, por las dimensiones del diseño, por practicidad de conexión y acoplamiento a los demás intercambiadores.

## 5. UBICACIÓN Y PUESTA A PUNTO DEL EQUIPO DE REFRIGERACIÓ

En la Figura 37 se observa el sistema de refrigeración seleccionado, el radiador con sus partes.



**Figura 37. Sistema de refrigeración radiador**

- 1- Tanque de entrada del agua al sistema
- 2- Panal (unión de tubos con aletas)
- 3- Tanque de salida del agua

Para la ubicación del sistema de enfriamiento, se presentan 4 propuestas (ver Anexos 24, 25, 26, 27, 28,29) se realiza el cálculo de sus respectivas pérdidas tanto mayores como menores, garantizando que la bomba tenga un trabajo óptimo. A continuación se mencionan datos que se necesitan para determinar la pérdida.

- ✓ Diámetros de la tubería: se trabaja con tubería de 1" y 1/2"
- ✓ Caudal de la bomba :  $35 \text{ l/min}$
- ✓ Cantidad de accesorios: depende de la propuesta.

### 5.1.Cálculos de pérdidas

Se realizan cálculos de las 5 propuestas presentadas, (ver Anexos 30, 31, 32, 33, 34, 36, 37, 38 y 39) donde se evidencia la magnitud de las pérdidas y se llega a la conclusión que la propuesta más conveniencia (ver Anexo 35) dando como resultado una pérdida dinámica de 74,56 m; con aprobación del jefe de taller Carlos Navarro se comienza con la instalación del sistema de enfriamiento.

### 5.2.Instalación y puesta a punto del sistema de enfriamiento

Con la autorización del jefe de talleres de mecánica, se traza una ruta de trabajo con base a la instalación del intercambiador de calor (radiador). La primera operación a realizar es la elaboración de un pie de amigo, hecho en acero en ángulo de *1 Pulgada* con medida de *50 × 25 cm*, para instalarlo en la base del suelo frente del intercambiador doble tubo (ver Figura 38).



*Figura 38. Base de radiador*

Seguidamente se desmonta la tubería en la salida de los dos fluidos de agua fría de los intercambiadores; para acoplar nueva tubería que entre al intercambiador de calor (radiador), se ensamblan dos termómetros uno después de la salida de los dos fluidos de agua de los intercambiadores y el segundo a la salida del agua del radiador.

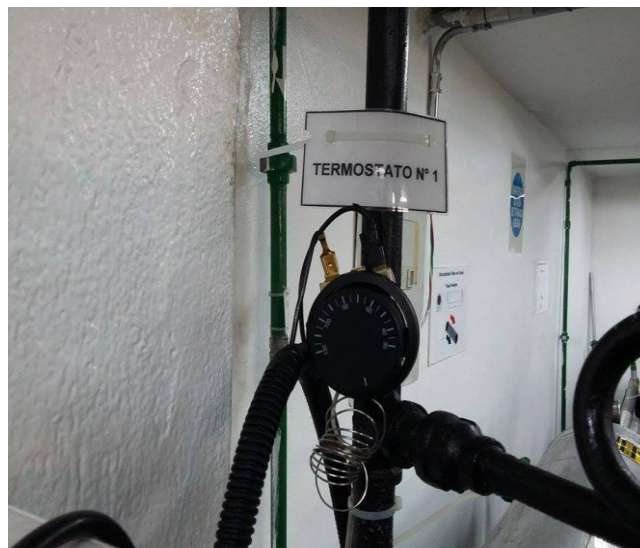


*Figura 39. Acoplamiento de tubería*

### **5.3.Instalación eléctrica**

Para articular la parte eléctrica al sistema de intercambiadores de calor, se tienen en cuenta contactores, guarda motor, borneras y selector presentado en el plano eléctrico de sistema, con el objetivo de automatizar el sistema (ver Anexo 40 y 41 del plano eléctrico).

- ✓ El sistema está protegido con un breaker que reemplaza al fusible; para evitar daños en elementos eléctricos, para que el sistema funcione se trabaja con dos termostatos, uno ubicado en el la entrada del flujo de agua sobrecalentada (vapor) que se calibra para que se accione a 40°C (ver Figura 40).



*Figura 40. Termostato 1*



- ✓ Al momento que el termostato da señal se energiza un flotador que está ubicado dentro de del tanque de almacenamiento del fluido frio (ver Figura 41); la función del flotador es evitar que el tanque baje su nivel y que la bomba no funcione en vacío.



**Figura 41. Posición de flotador 1**

- ✓ Para instalar el flotador eléctrico, es obligatorio desmontar toda la conexión del tanque. Al bajar el tanque se encontró contaminación por óxido, posteriormente se realizó su respectiva limpieza (ver Figura 42).







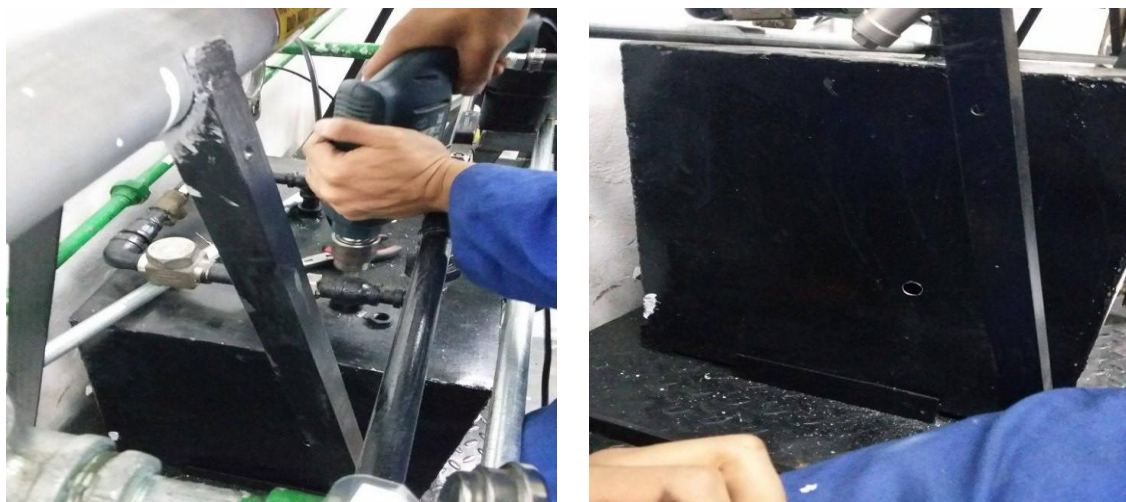
**Figura 42. Mantenimiento de tanque de almacenamiento de refrigerante**

- ✓ El segundo termostato se encuentra ubicado en la entrada del agua del radiador (ver Figura 43), este se encuentra graduado a  $30^{\circ}\text{C}$ . Al momento que se energiza; acciona los ventiladores y por consiguiente cumple con la convección forzada del sistema.



**Figura 43. Termostato 2**

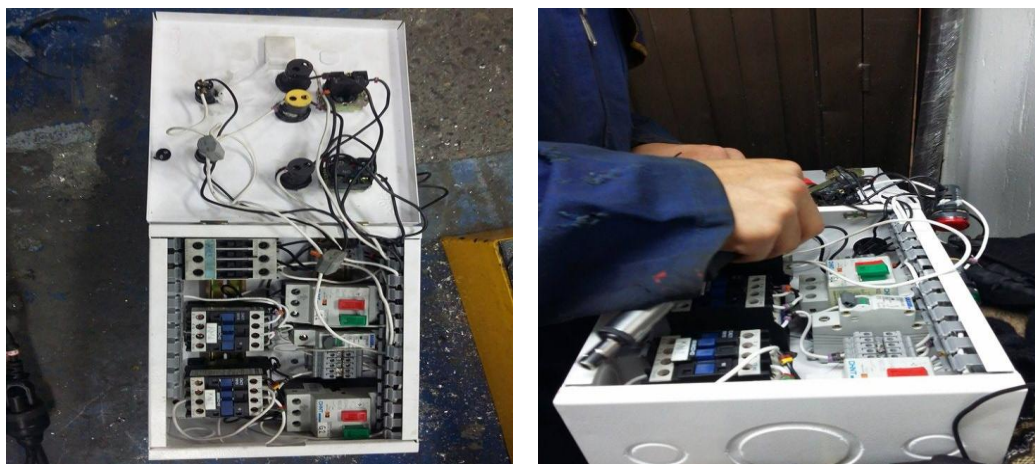
- ✓ En el sistema se encuentra otro flotador, que fue instalado en el depósito de condensados; la función de este, es que al momento que se llene el tanque envía señal a la bomba, para que esta succione y se desagüe el tanque ( ver Figura 44).



**Figura 44. Instalación de flotador tanque de condensados**

### **5.3.1. Tablero de mando**

En el tablero de mando, se encuentran instalados todos los elementos eléctricos y selectores para dar inicio al sistema automatizado (ver Figura 45).



**Figura 45. Conexiones de los elementos eléctricos**

- ✓ En el tablero de mando; se encuentra un selector de prendido y apagado, un pulsador de paro de emergencia con su respectivo piloto de color rojo, dos pilotos verdes, uno para la bomba 1 y en efecto otro para la bomba 2, igualmente para los ventiladores (ver Figura 46).



**Figura 46. Tablero de mando**

## **5.4.Evaluación y prueba del sistema eléctrico e hidráulico**

### *5.4.1. Primera prueba:*

Después de instalar todas las conexiones eléctricas e hidráulicas, se realiza la prueba de funcionamiento del mismo, con lo anteriormente mencionado; tienen que actuar los termostatos, de manera que envía la señal para que comience a funcionar el sistema. Para realizar esta prueba se calentó por medio de un mechero el termostato número 1; que se encuentra ubicado en la entrada del agua sobrecalentada, esta se activó y se encendió el piloto de la bomba 1 posteriormente se acciono automáticamente la bomba y comenzó a pasar el fluido por el sistema, de igual manera se colocó el mechero en el termostato número 2 y se encendió los pilotos de los ventiladores y automáticamente se activaron.

Terminada la práctica se concluyó que el sistema eléctrico e hidráulico funciona, de ahí que el tanque de almacenamiento de fluido de enfriamiento tiene estar en un nivel adecuado de agua; porque en el momento que baje el nivel automáticamente se apagara la bomba y de nuevo se encenderá cuando el nivel de agua se normalice (ver Figura 47).



***Figura 47. Prueba hidráulica paso del flujo refrigerante por el radiador***

#### ***5.4.2. Segunda prueba***

Esta prueba se realiza con todo el sistema en funcionamiento; se prende la caldera con su respectivo manual, se abren las puertas para evitar la acumulación de gases expulsados por la caldera, cuando la caldera se encuentra a 25 psi se abren las válvulas y se enciende el sistema de enfriamiento, el selector queda en posición ON se abre la válvula que da el paso del agua sobresaturada, en ese instante el termostato se activa y envía la señal para que la bomba empiece a funcionar, pasados unos minutos se energiza el termostato número 2 y comienza a funcionar los ventiladores. Se toman datos de la temperatura, del fluido de enfriamiento (agua fría) en la entrada y la salida del intercambiador coraza tubos, intercambiador doble tubo y el intercambiador de calor (radiador) respectivamente. Intervalos de 5 minutos durante 60 minutos (ver Figura 48).





**Figura 48. Prueba de funcionamiento parte eléctrica**

✓ Intercambiador coraza tubos

**Tabla 12. Datos de temperatura del fluido de refrigeración intercambiador tubos-coraza**

TIEMPO (min)	TEMPERATURA ENTRADA (°C)	TEMPERATURA SALIDA(°C)
0	16	16
5	20	29
10	30	39
15	42	40
20	40	48
25	42	50
30	46	54
35	47	52
40	47	51
45	46	58
50	46	54
55	49	56
60	51	59

✓ Intercambiador tubos concéntricos

**Tabla 13. Datos de temperatura del fluido de refrigeración intercambiador tubos concéntricos**

TIEMPO (min)	TEMPERATURA ENTRADA(°C)	TEMPERATURA SALIDA(°C)
0	16	16
5	20	20
10	30	30
15	38	38
20	42	40

25	44	42
30	46	44
35	47	46
40	46	46
45	45	45
50	47	46
55	49	48
60	50	50

✓ Sistema de enfriamiento (radiador)

**Tabla 14. Datos de temperatura de fluido refrigeración en el radiador**

TIEMPO (min)	TEMPERATURA ENTRADA( °C)	TEMPERATURA SALIDA( °C)
0	16	16
5	24	24
10	34	34
15	42	47
20	42	42
25	46	46
30	48	46
35	49	47
40	48	47
45	48	46
50	50	47
55	52	50
60	54	51

Observando las Tablas 12,13 y 14 se puede evidenciar que operando la planta durante 60 minutos la temperatura del agua no superó los 55°C, comparando con los datos tomados del proyecto “APRECIACIÓN, MODIFICACIÓN Y ADECUACIÓN DE DOS EQUIPOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR EXISTENTES EN DESUSO (TUBOS CONCÉNTRICOS, DE TUBOS Y CORAZA) DEL LABORATORIO DE TERMO FLUIDOS SEDE J, PARA ACOPLARLOS A LA CALDERA PIROTUBULAR MINIATURA ECCI3” se valida que en el mismo tiempo de prueba hay una diferencia de temperatura de más o menos 30°C.respecto al fluido de agua.

## 6. COMPARACIÓN DE FUNCIONAMIENTO CON EL EQUIPO NUEVO

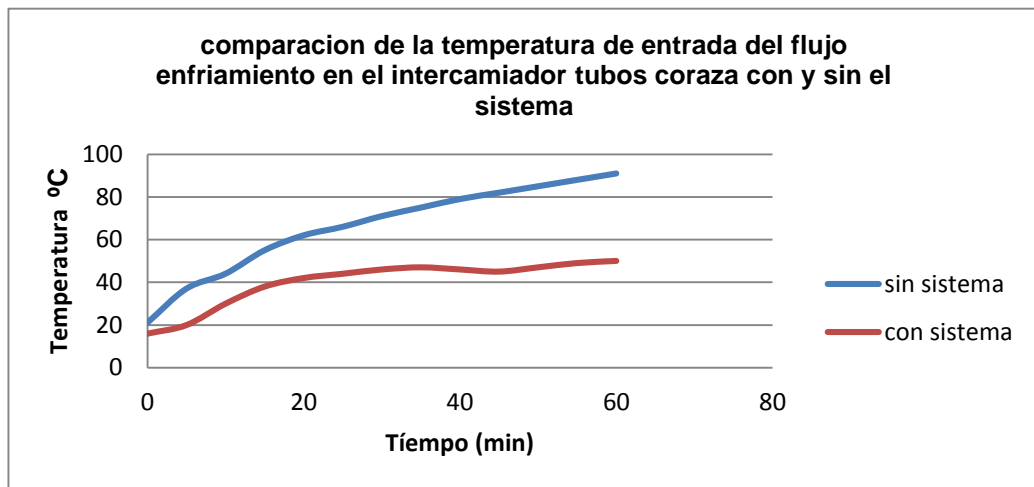
Esta comparación se efectúa con los datos obtenidos de la tesis anteriormente realizada por los compañeros, en consecuencia se evalúa antes de instalar el sistema de refrigeración vs acoplamiento del sistema.

### 6.1. Intercambiador coraza tubos antes- después

Comparación de datos temperatura de la entrada y salida de flujo refrigerante sin el sistema y con el sistema de refrigeración (ver Tabla 15).

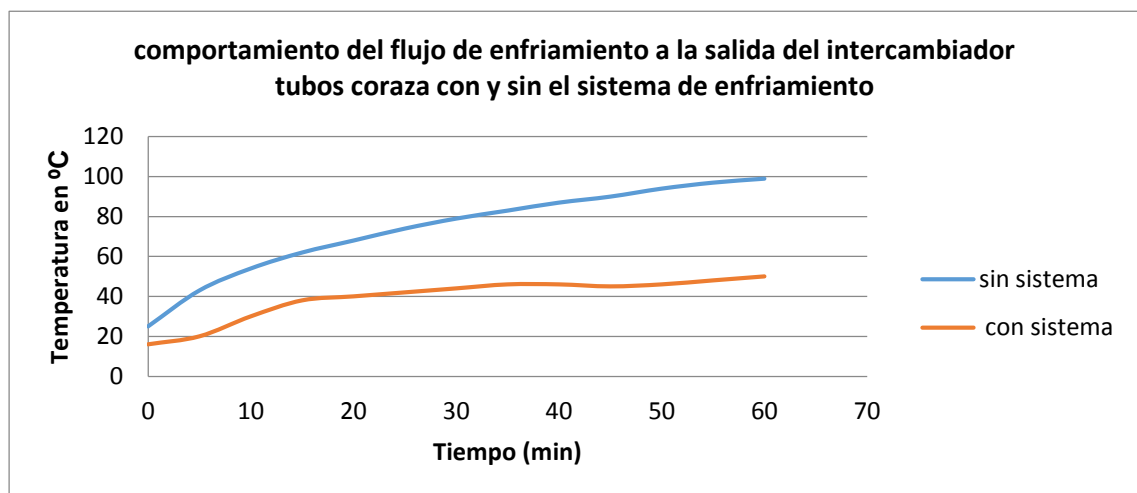
**Tabla 15. Comparación de temperaturas en la entrada y salida del fluido refrigerante intercambiador coraza tubo**

TIEMPO (MIN)	SIN SISTEMA DE REFRIGERACIÓN		CON SISTEMA DE REFRIGERACIÓN	
	TEMPERATURA ENTRADA( °C)	TEMPERATURA SALIDA( °C)	TEMPERATURA ENTRADA( °C)	TEMPERATURA SALIDA( °C)
0	21	25	16	16
5	37	43	20	20
10	44	54	30	30
15	55	62	38	38
20	62	68	42	40
25	66	74	44	42
30	71	79	46	44
35	75	83	47	lu
40	79	87	46	46
45	82	90	45	45
50	85	94	47	46
55	88	97	49	48
60	91	99	51	59



**Figura 49. Comparación de temperaturas de flujo de enfriamiento a la entrada del intercambiador coraza-tubos**

Observando la Figura 49 se evidencia el comportamiento de la temperatura de entrada al intercambiador coraza tubos, con el antes y después de la instalación del sistema de refrigeración en una prueba de 60 minutos.



**Figura 50. Comparación del flujo de enfriamiento a la salida del intercambiador coraza-tubos**

En la Figura 50 se evidencia un cambio de temperatura a la salida del intercambiador tubo coraza, sin el sistema de refrigeración la temperatura de salida es de 99°C, con el sistema de refrigeración la temperatura en la prueba de 60 minutos baja ostensiblemente en 49°C.

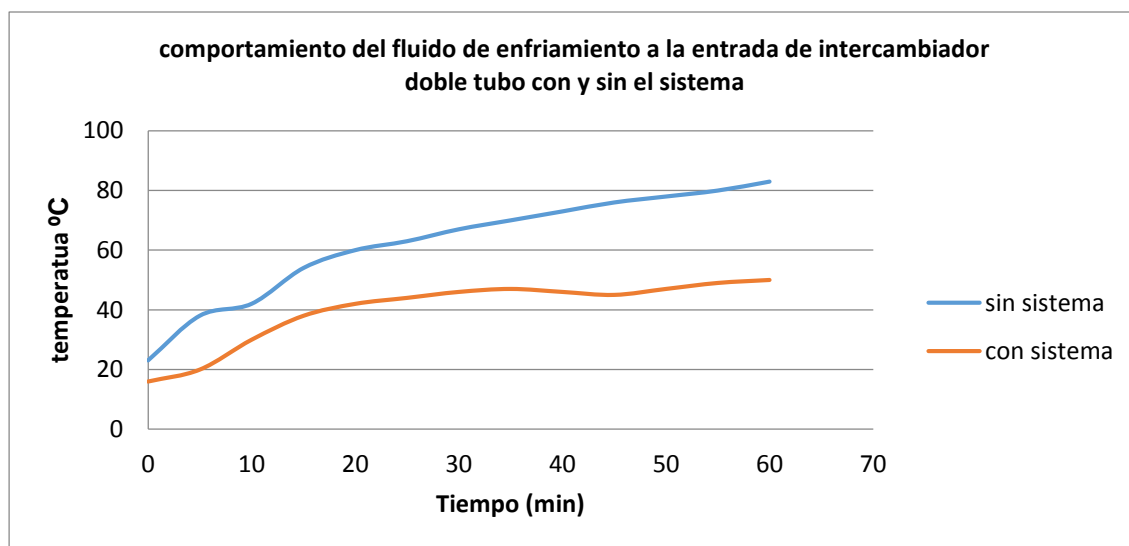


## 6.2. Intercambiador doble tubo

Comparación de datos temperatura de la entrada y salida de flujo refrigerante sin el sistema y con el sistema de refrigeración (ver Tabla 16).

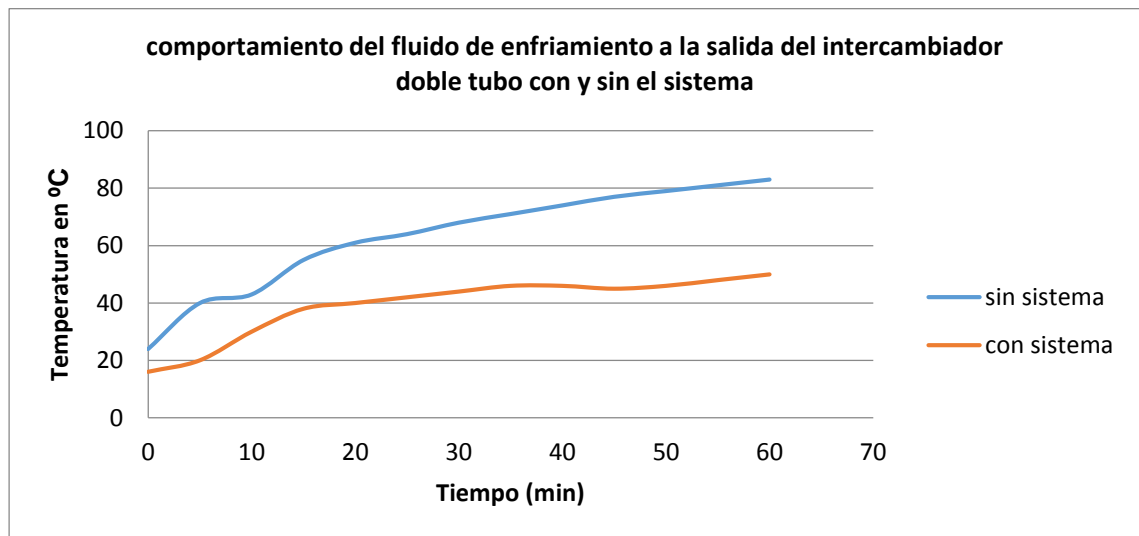
**Tabla 16. Comparación de temperaturas de flujo de refrigeración en el intercambiador tubos concéntricos**

TIEMPO (min)	SIN SISTEMA DE REFRIGERACIÓN		CON SISTEMA DE REFRIGERACIÓN	
	TEMPERATURA ENTRADA( °C)	TEMPERATURA SALIDA( °C)	TEMPERATURA ENTRADA( °C)	TEMPERATURA SALIDA( °C)
0	23	24	16	16
5	38	40	20	20
10	42	43	30	30
15	54	55	38	38
20	60	61	42	40
25	63	64	44	42
30	67	68	46	44
35	70	71	47	46
40	73	74	46	46
45	76	77	45	45
50	78	79	47	46
55	80	81	49	48
60	83	83	50	50



**Figura 51. Comportamiento del flujo refrigerante a la entrada del intercambiador tubos concéntricos**

En la Figura 51 se evidencia el comportamiento de la temperatura de entrada al intercambiador doble tubo, con el antes y después de la instalación del sistema de refrigeración en una prueba de 60 minutos.



**Figura 52. Comportamiento de flujo refrigerante a la salida del intercambiador tubos concéntricos**

En la Figura 52 se evidencia un cambio de temperatura notable a la salida del intercambiador doble tubo con el sistema de refrigeración instalado, la temperatura de salida bajo en **33°C**.

## **7. MANUAL DE OPERACIÓN [45]**

El siguiente manual consta de los pasos y precauciones, que se deben tener al momento de operar la caldera piro tubular ECCI3 y los intercambiadores, así se obtiene el funcionamiento del circuito térmico con fines educativos, para el aprendizaje de materias relacionadas con termodinámica y transferencia de calor.

Para iniciar con el manual de operación se deben conocer los componentes principales de los intercambiadores de calor, su funcionamiento y normas de seguridad para operar este equipo que esta acoplado a la caldera pirotubular ECCI3.

En este manual se desarrollaran los siguientes puntos:

- ✓ Explicación de conceptos básicos de transferencia de calor.
- ✓ Identificación de los componentes visibles de los intercambiadores de calor.
- ✓ Caracterización los componentes de la caldera pirotubular ECCI3
- ✓ Inicio del funcionamiento de la caldera para verificar y controlar los elementos de medición.
- ✓ Operación los intercambiadores de calor y toma de datos en un periodo de tiempo.
- ✓ Finalización del manual y Apagado de los intercambiadores y posteriormente la caldera.

### **7.1.EQUIPOS A UTILIZAR**

- ✓ Caldera
- ✓ Intercambiador tubos concéntricos.
- ✓ Intercambiador tubos con coraza.
- ✓ Intercambiador de placas - radiador
- ✓ Cronometro.
- ✓ Hoja de guía para la toma de datos.

### **7.2.ESQUEMA DE LOS INTERCAMBIADORES**



**Figura 53. Esquema de los intercambiadores de calor**

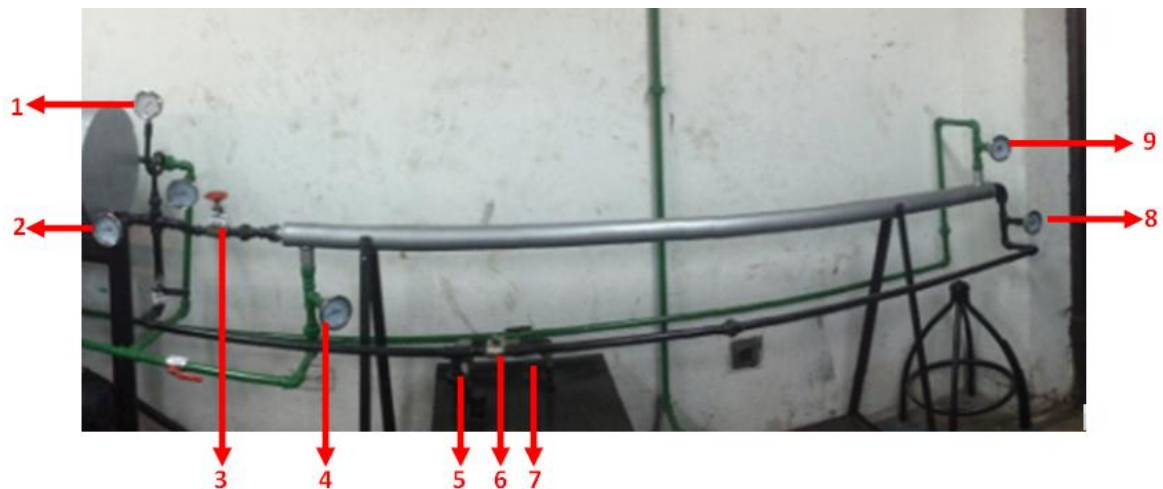
En la Figura 53 se muestra el esquema general de los intercambiadores y la ubicación de los mismos en el laboratorio de termofluidos.

### 7.2.1. Componentes de los intercambiadores

Para lograr el mayor entendimiento de los intercambiadores y su ubicación se señalan en la Figura 53, 54 y 55 los componentes de cada uno de los intercambiadores.

#### 7.2.1.1. Tubos concéntricos

Para tubos concéntricos se tienen los siguientes elementos (Figura 54):



**Figura 54. Componentes intercambiador de tubos concéntricos**

1. Manómetro línea caliente.
2. Termómetro entrada línea caliente ( $T_1$ )
3. Válvula globo conexión intercambiador tubos con coraza a tubos concéntricos

4. Termómetro salida línea fría ( $t_2$ )
5. Filtro condensados línea caliente
6. Válvula termodinámica línea caliente
7. Válvula cheque línea caliente
8. Termómetro salida línea caliente ( $T_2$ )
9. Termómetro salida línea fría ( $t_1$ )

#### 7.2.1.2. Tubos con coraza

Para tubos con coraza se tienen los siguientes elementos (Figura 55):



**Figura 55. Componentes intercambiador de tubos con coraza**

1. Flujometro
2. Termómetro entrada línea Caliente ( $T_1$ )
3. Termómetro entrada línea fría ( $t_1$ )
4. Manómetro salida tubos con coraza
5. Termómetro salida línea fría ( $t_2$ )
6. Termómetro salida línea Caliente ( $T_2$ )
7. Válvula globo

#### 7.2.1.3. Radiador

Para el radiador se tienen los siguientes elementos (Figura 56)

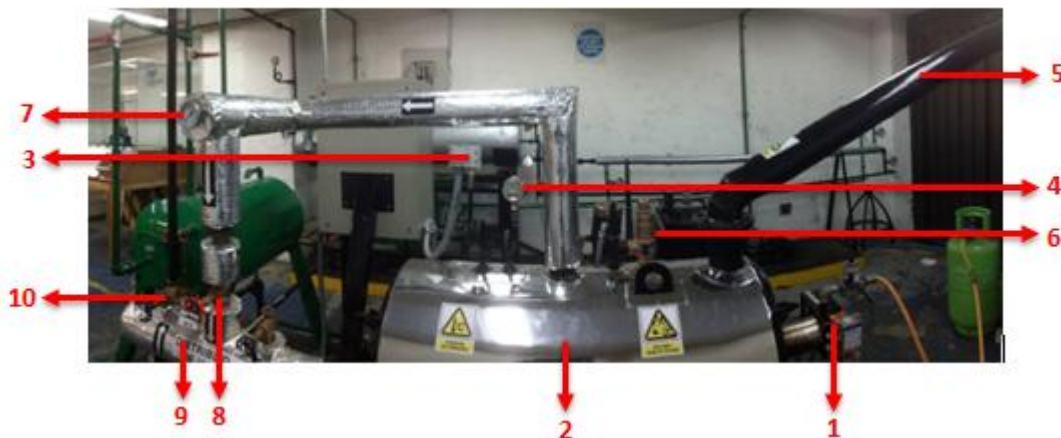


**Figura 56. Elementos del radiador**

1. Termómetro entrada línea fría ( $t_1$ )
2. Termostato 2
3. Ventiladores
4. Termómetro salida línea fría ( $t_2$ )

#### 7.2.1.4. Caldera

Para la caldera se tienen los siguientes elementos (Figura 57):



**Figura 57. Componentes de la caldera**

1. Quemador
2. Caldera
3. Presostato
4. Manómetro de presión
5. Tubo de escape
6. Válvula de alivio presión
7. Termómetro vapor de agua
8. Válvula de globo conexión de caldera a distribuidor

9. Distribuidor

10. Válvula globo conexión de distribuidor a intercambiador tubos con coraza

**¡IMPORTANTE!**

**Antes de realizar cualquier trabajo utilice el equipo de seguridad detallado a continuación:**



**GAFAS DE SEGURIDAD**



**GUANTES**

**7.3.PROCEDIMIENTO DE OPERACIÓN**

Tenga en cuenta los siguientes pasos y el orden de estos al momento de operar la caldera e intercambiadores.

*7.3.1. Puesta en marcha de la caldera*

Verifique que exista gas propano en el tanque de almacenamiento GLP y recargue el cilindro si aplica para iniciar la prueba.

- ✓ Ubique visualmente la caja de fusibles y accione el fusible que corresponde a la caldera pirotubular ECCI3.
- ✓ Accione la válvula (1) de entrada de agua al depósito (Figura 58).



*Figura 58. Válvula entrada de agua al depósito*



- ✓ Verifique el nivel de agua en la caldera y ajústelo hasta que quede en el nivel medio como se muestra en la siguiente imagen (Figura 59).



**Figura 59. Nivel de agua de la caldera**

- ✓ Si el nivel está por arriba abra la válvula (3) de desagüe hasta que esta quede en el nivel indicado (Figura 60).



**Figura 60. Válvula desagüe caldera**



- ✓ Si el nivel está por debajo no realice ninguna acción ya que la bomba conectada a la caldera regulara la entrada de agua hasta dejarla al nivel deseado.
- ✓ Verifique que las válvulas (4, 5, 6 y 13) en el distribuidor están cerradas (Figura 61).



*Figura 61. Distribuidor de vapor caldera*

- ✓ Abra la válvula (2) de paso de agua del depósito a la caldera (Figura 62).



*Figura 62. Válvula pasó de agua a la caldera*

- ✓ Accione la perilla que corresponde a la bomba de tal forma que esta quede en la posición “automática” (Figura 63).



**Figura 63. Tablero eléctrico accionamiento bomba de agua**

- ✓ Accione la perilla del quemador hasta que quede en la posición “ON” (Figura 64).



**Figura 64. Perilla del quemador de la caldera**

- ✓ Abra la válvula del cilindro de gas (Figura 65).



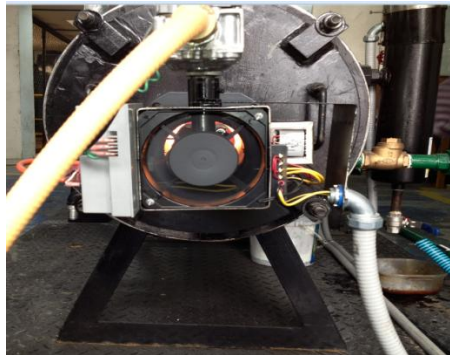
**Figura 65. Válvula cilindro**

- ✓ Accione la perilla del quemador en el tablero eléctrico y que esta quede en posición "ON". Al encender el quemador el dissipador (ventilador) empieza a funcionar, pasados 40 segundos se enciende el quemador (Figura 66).



**Figura 66. Tablero eléctrico accionamiento quemador**

- ✓ Se debe confirmar visualmente si la caldera está en funcionamiento desde la parte posterior a esta como se señala en la (Figura 67).



**Figura 67. Quemador encendido**

- ✓ Inspeccione el manómetro de presión de la caldera hasta que esta llegue a 32 *psi* (Figura 68).



**Figura 68. Manómetro de presión caldera**

- ✓ Inspeccione el termómetro que está ubicado cerca al distribuidor y los cambios de temperatura (Figura 69).



**Figura 69. Termómetro de caldera**

La presión de la caldera tardará unos minutos para alcanzar la presión de trabajo (32 *psi*).

#### *7.3.2. Puesta en marcha de los intercambiadores*

Al estar en funcionamiento la caldera y antes de que esta llegue a presión de trabajo realice los siguientes pasos:

- ✓ Verifique el nivel de agua en el depósito y si el nivel se encuentra por debajo del máximo accione la válvula (7) de entrada de agua al depósito (Figura 70).
- ✓ Luego que el nivel llegue al máximo cierre la válvula (7).



**Figura 70. Nivel de agua depósito y válvula 7**

Si en el proceso el nivel de agua baja abra la válvula.

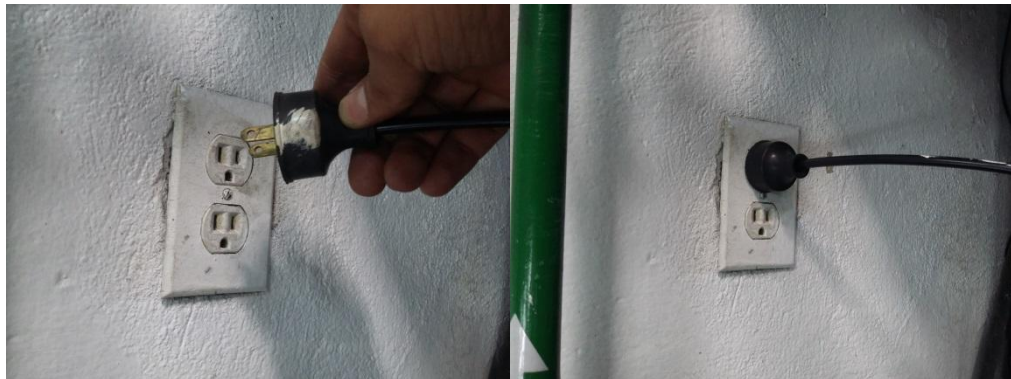
- ✓ Accione las válvulas (N° 8 y 9) de salida de la bomba N°1 de tal forma que estas queden totalmente abiertas (Figura 71).





**Figura 71. Válvula 8 y 9**

- ✓ Conectar la clavija a la toma corriente 110V que está conectada al tablero de control de bombas (Figura 72).



**Figura 72. Conexión de clavija a toma corriente 110V**

- ✓ Dirigirse al tablero de control de bombas y girar el pulsor de parada de emergencia tipo hongo hasta que deje de estar prendido el testigo rojo, si el testigo está apagado omitir este paso (Figura 73).



**Figura 73. Tablero energizado para control automático de bombas**

- ✓ Accionar la perilla de control eléctrico a la posición “ON” (Figura 74).



*Figura 74. Posición de perillas para energizar sistemas de bombeo y ventilación*

- ✓ El sistema no efectuará ninguna acción ya que se activará con respecto a estimulaciones térmicas (bomba 1 y ventiladores del radiador) o de nivel de agua (bomba 1 y 2).

**IMPORTANTE:** Verificar siempre el nivel del tanque de agua fría sobre el señalado, ya que se encuentra ubicado un sensor de nivel que trabaja conjuntamente con el termostato 1 y le dan señal para prender la bomba 1.

#### *7.3.3. Tipo de operación*

Si el manómetro de la caldera ya llegó a 25 *psi* o si la caldera dejó de funcionar realice los siguientes pasos dependiendo el tipo de configuración valvular para utilizar un intercambiador o los dos:

#### **I. Tipo de operación para el funcionamiento del intercambiador de tubos con coraza.**

- ✓ Cierre la válvula globo N° 10 que comunica los dos intercambiadores (Figura 75).



**Figura 75. Válvula 10 conexión intercambiador tubos con coraza y concéntricos**

- ✓ Cierre la válvula N° 11 de la línea de retorno de Caliente y abra la N° 12 (Figura 76).



**Figura 76. Válvulas 11 y 12**

- ✓ Diríjase al distribuidor y accione la válvula N° 4 lentamente hasta que esta quede totalmente abierta (al realizar este paso, está generando que el vapor entre al distribuidor, y si existen trazos de agua que estos se dirijan automáticamente al depósito de la caldera (Figura 77).



**Figura 77. Distribuidor de vapor caldera**

- ✓ Verifique el valor de presión en el manómetro de la caldera y si la presión está en 25 *psi* accione lentamente la válvula N° 5 permitiendo el paso a los intercambiadores (Figura 78).



**Figura 78. Manómetro presión caldera**

- ✓ Al llegar el vapor a la válvula N° 13, esperar 5 minutos a que el termostato 1 de la señal para que se prenda la bomba 1. El termostato 1 (Figura 79) unido en la parte exterior del tubo antes de la válvula, está calibrado para que cuando su capilar sienta 40°C de señal para activar la bomba 1. Esta operación se realiza para que inicie la circulación de agua a través de los intercambiadores y no exista un choque térmico al momento que circule el vapor por los mismos.



**Figura 79. Termostato 1**



- ✓ Verifique que se activa el testigo verde en el tablero de control de las bombas, indicando que la bomba 1 (Figura 80) está funcionando correctamente y que no se prenda y apague intermitentemente, si es el caso valide el nivel de agua del tanque para que esté por encima del sensor de nivel (Figura 81).



**Figura 80. Testigo verde activo indicando que la bomba 1 esta prendida**



**Figura 81. Sensor de nivel de agua que activa bomba 1**

- ✓ Accione la válvula N° 13 para permitir el paso al intercambiador de tubos con coraza (Figura 82).



**Figura 82. Válvula 13**

- ✓ Realice las lecturas a los datos registrados en termómetros del 1 al 7 y manómetros N° (3 y 4) como se indica en la guía de laboratorio.
- ✓ Validar en el proceso que los testigos pequeños indicadores de ventiladores en el tablero de control (Figura 83) se activen cuando la temperatura del fluido del agua fría aumente a más de 35°C, esto se puede calibrar en el termostato 2 (Figura 84) para brindar mejor refrigeración en el agua dentro del radiador.



**Figura 83. Verificación de testigos de ventiladores encendidos**



**Figura 84. Termostato 2**

## **II. Tipo de operación para el funcionamiento del intercambiador de tubos con coraza y tubos concéntricos.**

- ✓ Abra la válvula globo N° 10 que comunica los dos intercambiadores (Figura 85).



**Figura 85. Válvula 10 conexión intercambiador tubos con coraza y concéntricos**

- ✓ Cierre la válvula N° 12 de la línea de retorno de fluido caliente y abra la N° 11 (Figura 86).



**Figura 86. Válvula 11 y 12**

- ✓ Diríjase al distribuidor y accione la válvula N° 4 lentamente hasta que esta quede totalmente abierta (Figura 87) (al realizar este paso está generando que

el vapor entre al distribuidor, y si existen trazos de agua estos se dirijan automáticamente al depósito de la caldera).



*Figura 87. Distribuidor de vapor*

- ✓ Verifique el valor de presión en el manómetro (1) y si la presión está en 25 *psi* accione lentamente la válvula N° 5 permitiendo el paso a los intercambiadores (Figura 88).



*Figura 88. Válvula 5 en el distribuidor de calor*

- ✓ Al llegar el vapor a la válvula N° 13, esperar 5 minutos a que el termostato 1 de la señal para que se prenda la bomba 1. El termostato 1 (Figura 89) unido en la parte exterior del tubo antes de la válvula, está calibrado para que cuando su capilar sienta 40°C de señal para activar la bomba 1. Esta operación se realiza para que inicie la circulación de agua a través de los intercambiadores y no exista un choque térmico al momento que circule el vapor por los mismos.



**Figura 89. Termostato 1**

- ✓ Verifique que se activa el testigo verde en el tablero de control de las bombas, indicando que la bomba 1 (Figura 90) está funcionando correctamente y que no se prenda y apague intermitentemente, si es el caso valide el nivel de agua del tanque para que esté por encima del sensor de nivel (Figura 91).



**Figura 90. Testigo verde activo indicando que la bomba esta prendida**



**Figura 91. Sensor de nivel de agua que activa la bomba 1**

- ✓ Accione la válvula N° 13 para permitir el paso al intercambiador de tubos con coraza y tubos concéntricos (Figura 92).





**Figura 92. Válvula 13**

- ✓ Realice las lecturas a los datos registrados en termómetros (1 al 7) y manómetros N° (2 y 3) como se indica en la guía de laboratorio.
- ✓ Validar en el proceso que los testigos pequeños indicadores de ventiladores en el tablero de control (Figura 93) se activen cuando la temperatura del fluido del agua fría aumente a más de 35°C, esto se puede calibrar en el termostato 2 (Figura 94) para brindar mejor refrigeración en el agua dentro del radiador.



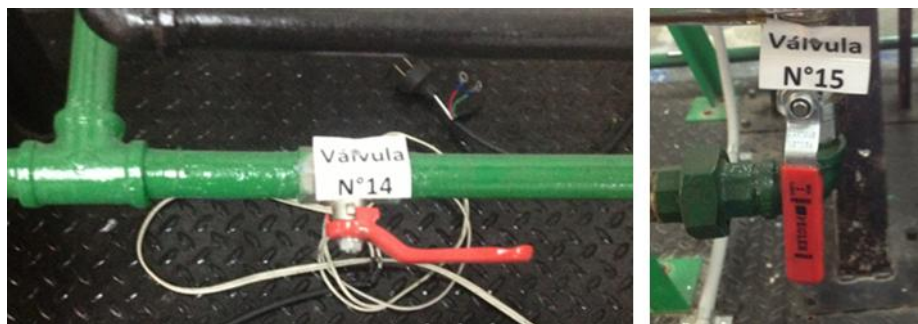
**Figura 93. Verificación de testigos de ventiladores encendidos**



**Figura 94. Termostato 2**

NOTA: Si ya está operando el intercambiador de tubos con coraza y desea poner en funcionamiento los dos intercambiadores se requiere que solo abra las válvulas N° 10 y 11 y cierre las N° 12.

Las válvulas 14 y 15 deben permanecer abiertas en toda la operación (Figura 95).



**Figura 95. Válvulas 14 y 15**

#### **7.4.FINALIZACIÓN DEL PROCESO Y APAGADO DEL SISTEMA**

Para finalizar el proceso térmico se requiere:

- ✓ Cerrar la válvula del cilindro de gas propano
- ✓ En el tablero eléctrico accionar la perilla del quemador y la bomba de la caldera a la posición off
- ✓ En el quemador se debe accionar la perilla a la posición off
- ✓ Cerrar las válvulas 4, 5 y 6 del distribuidor
- ✓ Puede esperar a que se apague el sistema automáticamente cuando dejen de sentir temperatura los termostatos o simplemente girar la perilla de control eléctrico a la posición "OFF", oprimir el pulsor de emergencia tipo hongo y desconectar la clavija de la toma corriente.
- ✓ Cierre las válvulas 1 y 7.

## 7.5.MANTENIMIENTO DEL EQUIPO DE TRANSFERENCIA DE CALOR (INTERCAMBIADORES)

El equipo está diseñado con dos depósitos de almacenamiento de agua (línea fría y condensada) a los cuales se les debe realizar mantenimiento cada 6 meses drenándolos. Estos depósitos son:

### 7.5.1. Depósito línea fría

Este depósito recoge los fluidos de los intercambiadores el cual recircula por el circuito con una válvula N° 16 (Figura 96) como se muestra en la siguiente imagen la cual debe ser operada para liberar líquido que contiene.



Figura 96. Válvula de drenaje 16

### 7.5.2. Deposito condensados

Este depósito contiene los condensados que se producen al final de los intercambiadores de la línea caliente, los cuales al no ser recirculados hacia el depósito de la caldera por medio del sensor de nivel que activa la bomba 2; se deberá realizar el mantenimiento soltando el tapón que está detrás del depósito de condensados con una llave de tubos y retirar el fluido que exista.



## 8. GUIA DE LABORATORIO PLANTA CALDERA PIROTUBULAR ECCI 3, INTERCAMBIADORES DE CALOR Y SUPERFICIE EXTENDIDA RADIADOR

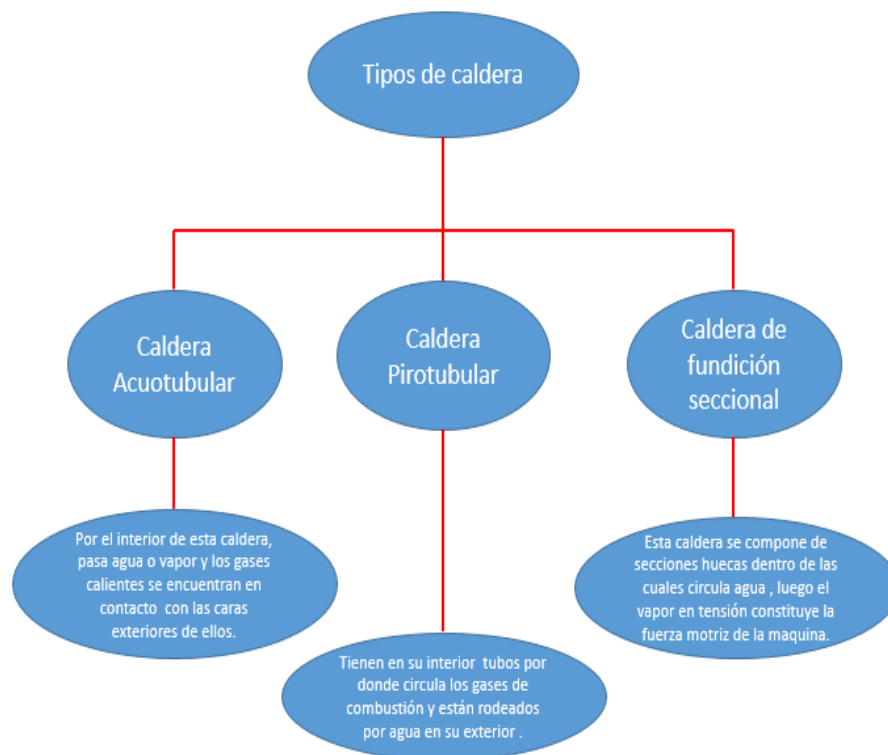
### 8.1.Objetivos:

- Conocer los diferentes equipos existentes acoplados en la caldera pirotubular ECCI 3 e intercambiadores de calor.
- Identificar los diferentes componentes.
- Definir los pasos para la practica

### 8.2.Conceptos básicos:

#### 8.2.1. Calderas

Una caldera es un generador de vapor, en efecto viene en un recipiente cerrado que transforma un líquido en vapor a una presión y temperatura determinada, mediante la aplicación de un foco calorífico (ver Figura 97).

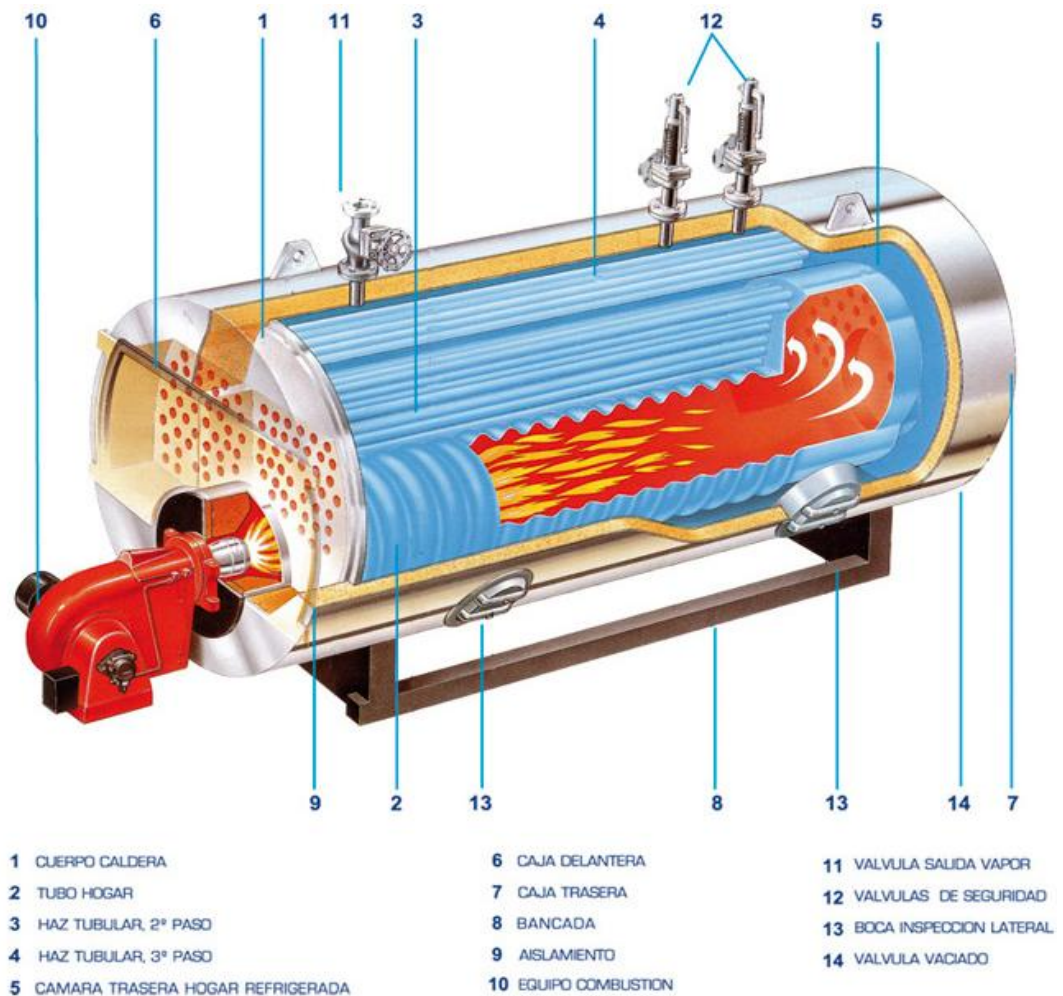


**Figura 97. Tipos de calderas**

Las calderas pirotubulares pueden ser horizontales y verticales. Las primeras hacen referencia a que los tubos tienen posición horizontal por donde pasan los gases de combustión, los tubos se encuentran sumergidos para evitar así las tensiones que se originan en los tubos secos. La caldera vertical se utiliza para hacer una buena ubicación de espacios ya que sus tubos de gases tienen sentido de abajo hacia arriba o viceversa.

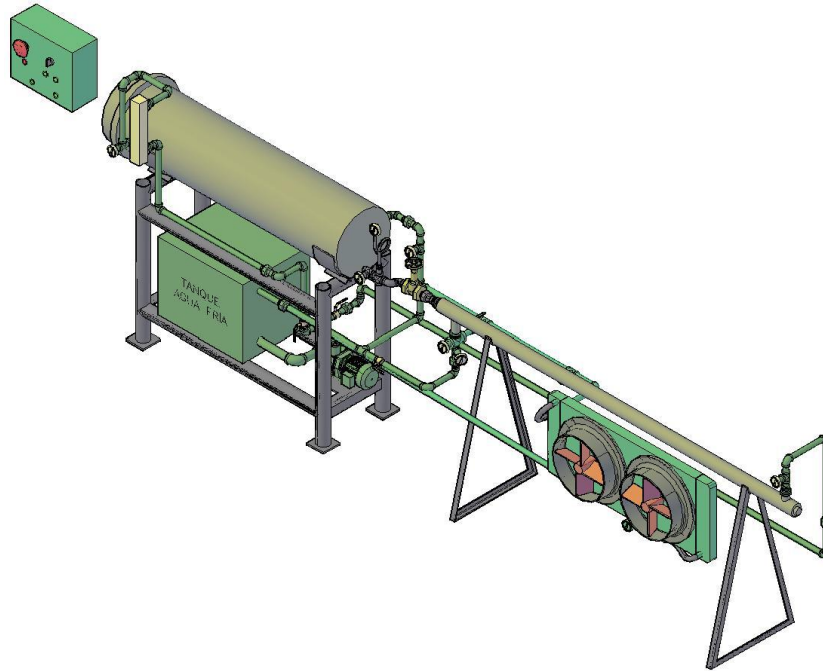
Las calderas pirotubulares son adecuadas para instalaciones con presiones de trabajo inferiores a 20 bares. Debido al gran volumen de agua que almacenan, presentan inconvenientes en una larga puesta de trabajo de la caldera.

En la Figura 98 puede observar las diferentes partes de la caldera pirotubular similar a la que se puede observar en el laboratorio de termo fluidos.



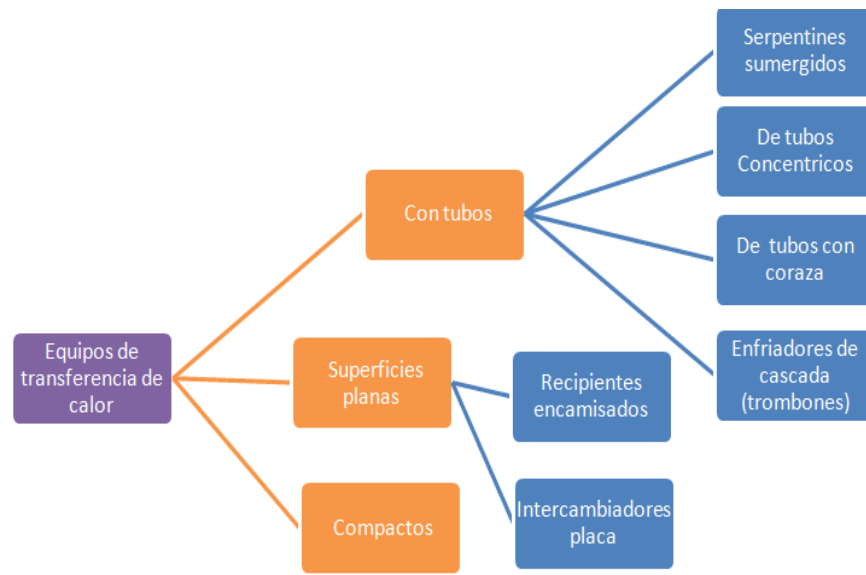
**Figura 98. Partes de caldera pirotubular horizontal [39].**

### 8.2.2. Intercambiadores de calor



**Figura 99. Sistema de intercambiadores de calor en el laboratorio de termofluidos**

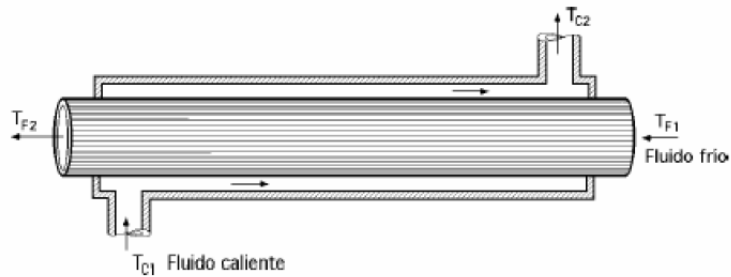
La clasificación de los equipos de transferencia de calor es amplia según el tipo de aplicación. Los equipos de transferencia de calor pueden abarcar procesos como producción de energía, refrigeración, calefacción, acondicionamiento de aire, para elaboración de productos químicos, refinación de petróleo; también el funcionamiento de los vehículos de combustión interna depende de los intercambiadores de calor los cuales llevan el nombre de radiadores (ver Figura 100).



**Figura 100. Clasificación de equipos de transferencia de calor [40].**

✓ Intercambiador tubos concéntricos

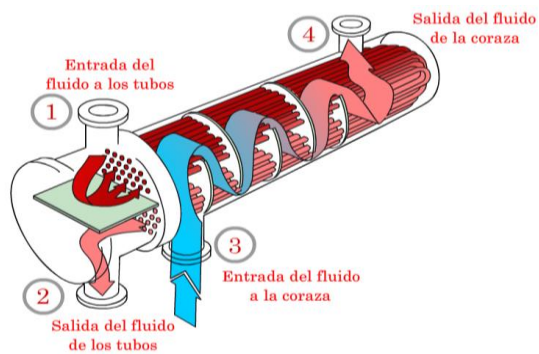
Conocido también como intercambiador de doble tubo. Consiste en dos tubos concéntricos lisos o con aletas, donde el fluido frío circula por el espacio anular (exterior) mientras el fluido caliente circula por el tubo interior (ver Figura 101).



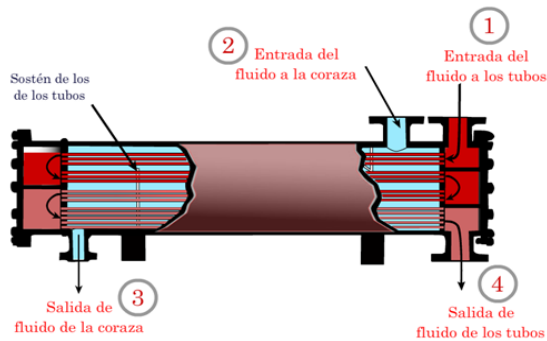
**Figura 101. Intercambiador de calor tubos concéntricos [41].**

✓ Intercambiador tubos con coraza

El intercambiador de calor de coraza y tubos es el más utilizado en la industria. Está formado por una coraza y por múltiples tubos. Se clasifican por el número de veces que pasa el fluido por la coraza y por el número de veces que pasa el fluido por los tubos (ver Figura 102 y 103).

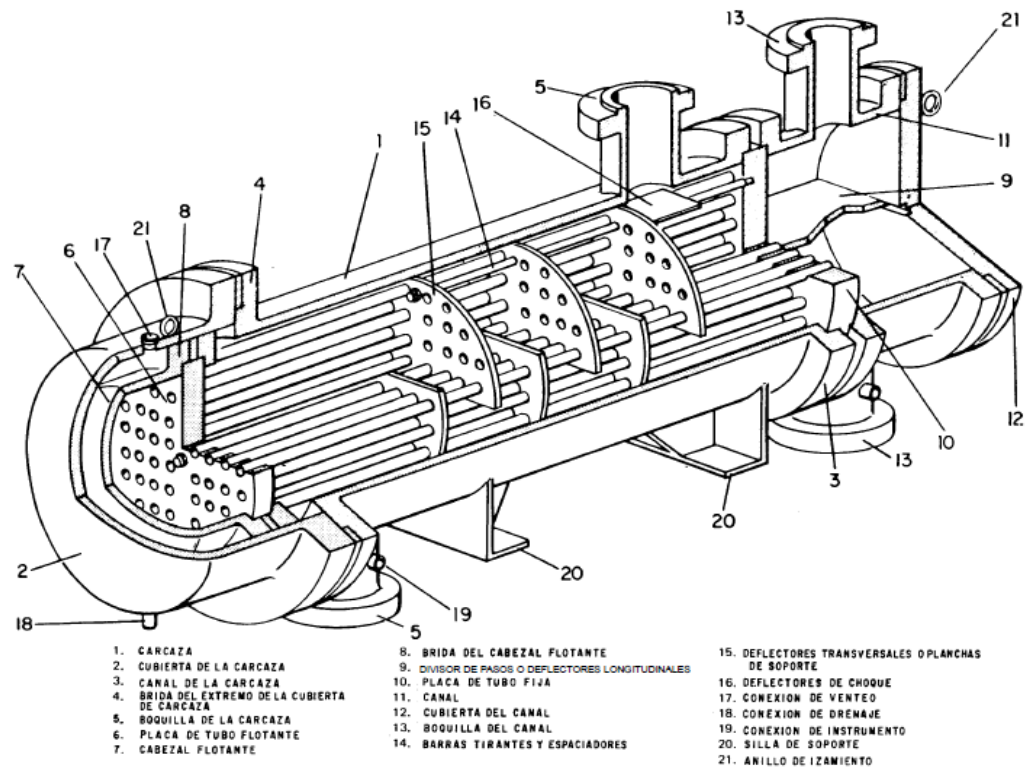


**Figura 102. Intercambiador de calor tubos con coraza 1-2 [42].**



**Figura 103. Intercambiador de calor tubos con coraza 1-4 [43].**

En la Figura 104 se pueden observar las partes principales de un intercambiador de calor coraza-tubos. Similar al conectado a la caldera ECCI 3.



**Figura 104. Partes principales de intercambiador de calor tubos con coraza [44].**

### 8.3. Practica de laboratorio

Para el comienzo de la prueba de laboratorio es necesario conocer el manual de operación de la caldera pirotubular ECCI 3, en él se encuentran los pasos para el encendido de la caldera pirotubular.

En las siguientes Tabla 17 se toman datos en la corrida de los intercambiadores coraza-tubo y tubos concéntricos. Escriba la lectura de los termómetros, completando la siguiente tabla. Recuerde que  $t_1$  y  $t_2$  son las temperaturas del fluido frío, mientras  $T_1$  y  $T_2$  el fluido caliente.

Tabla 17. Toma de datos para práctica

Toma de datos				
Intercambiador tubos con coraza				
Tiempo (minutos)	Temperatura línea fría		Temperatura línea Caliente	
	$t_1$	$t_2$	$T_1$	$T_2$
0				
5				
10				
15				
20				
25				
30				
35				
40				
45				
50				
55				
60				

Intercambiador tubos con coraza y concéntricos				
Tiempo (minutos)	Temperatura línea fría		Temperatura línea Caliente	
	$t_1$	$t_2$	$T_1$	$T_2$
0				
5				
10				
15				
20				
25				
30				
35				
40				
45				
50				
55				
60				

Intercambiador de calor de placas -Radiador		
Tiempo (minutos)	Temperatura entrada $t_1$	Temperatura salida $t_2$
0		
5		
10		
15		
20		
25		
30		
35		
40		
45		
50		
55		
60		


### 8.3.1. Grafica de valores

Grafique los valores obtenidos en Excel y analice los resultados de los fluidos calientes y fríos junto con la eficiencia de cada intercambiador de calor.

### 8.3.2. Practica en el radiador

Realice con el termómetro, la siguiente prueba con el intercambiador de calor de superficies extendidas (radiador):

✓ Establezca las temperaturas de entrada y salida del agua y del aire

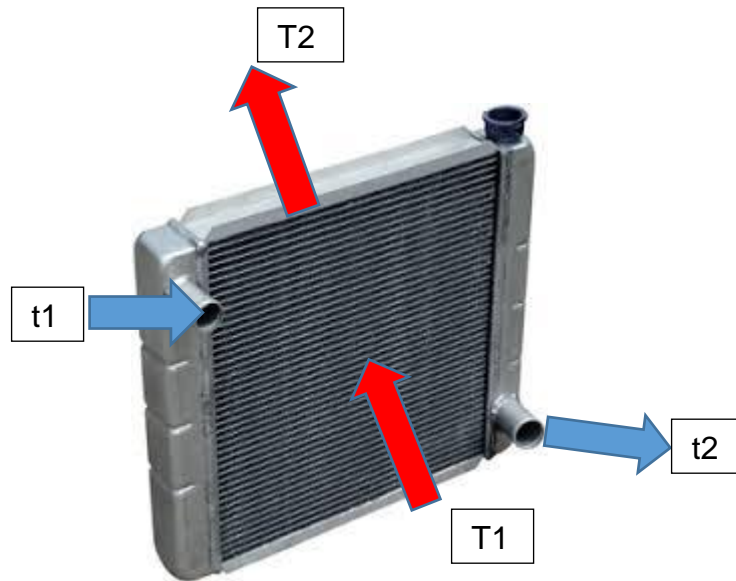
t1-Temperatura de entrada de agua 

t2-Temperatura de salida de agua 

T1-Temperatura de entrada de aire 

T2-Temperatura de salida de aire 





Con la toma de datos, proceda a calcular la efectividad del radiador por el método de Número de Unidades de transferencia (NTU), teniendo en cuenta las temperaturas del agua y aire. A continuación encontrará las tablas de aire (ver Tabla 19) y agua (ver Tabla 18) para realizar la iteración y así completar los valores del cálculo de eficiencia del radiador.

**Tabla 18. Propiedades del agua líquida a presión atmosférica [34]**

**Tabla 4.5: Propiedades del agua líquida a presión atmosférica**

T (°C)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$c_p$ (kJ/kg·K)	$\mu \cdot 10^6$ (N·s/m <sup>2</sup> )	$\nu \cdot 10^6$ (m <sup>2</sup> /s)	$k \cdot 10^3$ (W/m·K)	$\alpha \cdot 10^6$ (m <sup>2</sup> /s)	$\beta \cdot 10^{-3}$ (1/K)	Pr
0.001	1005	4.213	1766	1.757	567.2	0.1339	-0.08021	13.12
5	1004	4.201	1506	1.500	574.8	0.1363	0.01135	11.00
10	1003	4.191	1300	1.297	583.0	0.1387	0.08744	9.348
15	1001	4.184	1135	1.134	591.4	0.1412	0.1523	8.033
20	999.5	4.180	1001	1.001	599.8	0.1436	0.209	6.975
25	997.9	4.176	890.1	0.8920	608.0	0.1459	0.2594	6.114
30	996.2	4.175	797.6	0.8007	616.0	0.1481	0.3051	5.406
35	994.3	4.174	719.6	0.7238	623.6	0.1503	0.347	4.817
40	992.4	4.174	653.3	0.6583	630.7	0.1523	0.3859	4.323
45	990.3	4.175	596.3	0.6022	637.4	0.1542	0.4225	3.906
50	988.1	4.177	547.1	0.5537	643.6	0.1559	0.4572	3.551
55	985.7	4.179	504.2	0.5115	649.3	0.1576	0.4903	3.245
60	983.2	4.182	466.6	0.4746	654.4	0.1592	0.5221	2.981
65	980.6	4.184	433.5	0.4420	659.1	0.1606	0.5528	2.752
70	977.9	4.188	404.1	0.4132	663.2	0.1620	0.5827	2.551
75	975.0	4.191	378.0	0.3877	666.9	0.1632	0.6118	2.375
80	971.9	4.195	354.6	0.3648	670.2	0.1644	0.6402	2.219
85	968.8	4.199	333.6	0.3443	673.0	0.1654	0.6682	2.081
90	965.5	4.204	314.6	0.3259	675.5	0.1664	0.6958	1.958
95	962.1	4.209	297.5	0.3092	677.5	0.1673	0.723	1.848
100	958.5	4.214	281.9	0.2941	679.3	0.1682	0.7501	1.749

Fuente: S.A. Klein y F.L. Alvarado, "Engineering Equation Solver Software (EES)", Academia Versión 6.271 (20-07-2001).

**Tabla 19. Propiedades del aire seco a presión atmosférica [35]**

**Tabla 4.4.1: Propiedades del aire seco a presión atmosférica**

T (°C)	$\rho$ (kg/m³)	$c_p$ (kJ/kg·K)	$\mu \cdot 10^6$ (N·s/m²)	$\nu \cdot 10^6$ (m²/s)	$k \cdot 10^3$ (W/m·K)	$\alpha \cdot 10^6$ (m²/s)	Pr
-150	2.867	0.9825	8.636	3.013	11.71	4.157	0.7246
-100	2.039	0.9656	11.9	5.835	15.82	8.034	0.7263
-90	1.927	0.9753	12.49	6.482	16.62	8.842	0.733
-80	1.828	0.9835	13.07	7.153	17.42	9.692	0.7381
-70	1.738	0.9901	13.64	7.85	18.22	10.59	0.7414
-60	1.656	0.9952	14.2	8.572	19.01	11.53	0.7433
-50	1.582	0.999	14.74	9.317	19.79	12.52	0.744
-40	1.514	1.002	15.27	10.08	20.57	13.56	0.7436
-30	1.452	1.004	15.79	10.88	21.34	14.65	0.7425
-20	1.394	1.005	16.3	11.69	22.11	15.78	0.7408
-10	1.341	1.006	16.8	12.52	22.88	16.96	0.7387
0	1.292	1.006	17.29	13.38	23.64	18.17	0.7362
5	1.269	1.006	17.54	13.82	24.01	18.8	0.735
10	1.247	1.006	17.78	14.26	24.39	19.44	0.7336
15	1.225	1.007	18.02	14.71	24.76	20.08	0.7323
20	1.204	1.007	18.25	15.16	25.14	20.74	0.7309
25	1.184	1.007	18.49	15.61	25.51	21.4	0.7296
30	1.164	1.007	18.72	16.08	25.88	22.08	0.7282
35	1.146	1.007	18.95	16.54	26.25	22.76	0.7268
40	1.117	1.007	19.18	17.02	26.62	23.45	0.7255
45	1.11	1.007	19.41	17.49	26.99	24.16	0.7241
50	1.092	1.007	19.63	17.97	27.35	24.87	0.7228
55	1.076	1.007	19.86	18.46	27.72	25.59	0.7215
60	1.06	1.007	20.08	18.95	28.08	26.31	0.7202
65	1.044	1.007	20.3	19.45	28.45	27.05	0.719
70	1.029	1.007	20.52	19.95	28.81	27.79	0.7177
75	1.014	1.008	20.74	20.45	29.17	28.55	0.7166
80	0.9996	1.008	20.96	20.97	29.53	29.31	0.7154
85	0.9857	1.008	21.17	21.48	29.88	30.07	0.7143
90	0.9721	1.008	21.39	22	30.24	30.85	0.7132
95	0.9589	1.009	21.6	22.52	30.6	31.63	0.7121
100	0.946	1.009	21.81	23.05	30.95	32.42	0.7111
110	0.9213	1.01	22.23	24.12	31.65	34.02	0.7092
120	0.8979	1.011	22.64	25.21	32.35	35.64	0.7073
130	0.8756	1.012	23.05	26.32	33.05	37.3	0.7057
140	0.8544	1.013	23.45	27.44	33.74	38.98	0.7041
150	0.8343	1.014	23.85	28.59	34.43	40.68	0.7027

$$\epsilon = \frac{\dot{m}_a * C_{pa} (t_1 - t_2)}{\dot{m}_r * C_{pr} (t_1 - T_1)}$$

Donde:

$\dot{m}_a$ : Flujo masico del agua

$\dot{m}_r$ : flujo masico del aire

$C_{pa}$ : calor especifico del agua, (tabla iteración)

$C_{pr}$ : calor especifico del aire, (tabla iteración)

✓ La ecuación del flujo másico de agua se determina:

$$\dot{m}_a = C_a * \rho$$

Donde:

$C_a$ : caudal del liquido de refrigeración (agua, ver caudal en el flujometro)

$\rho$ : densidad del agua (tablas iteración)

✓ La ecuación del flujo másico de aire se determina:

$$\dot{m}_r = V \rho A_t$$

Donde:

$V$ : velocidad del aire de refrigeración (ventilador) ( $6,1 \text{ m/s}$ )

$\rho$ : densidad del aire (tablas iteración)  
 $A_t$ : área total del radiador ( $0,2909\text{m}^2$ )

Con la determinaron de la eficiencia del radiador; establezca 3 recomendaciones que mejoren el rendimiento del sistema de enfriamiento.

### 8.3.3. Cuestionario

Después de la toma de datos en la prueba de laboratorio y para generar una socialización de conceptos, resuelva el siguiente cuestionario.

1. ¿Qué sucede cuando se trabaja únicamente el intercambiador de coraza-tubos con el radiador?
2. ¿Qué sucede cuando se trabaja en serie los intercambiadores de calor?
3. ¿Qué variación se puede ver en el caudal del fluido frío al trabajar el intercambiador de coraza-tubos con el radiador y el funcionamiento de todos los intercambiadores de calor en serie?
4. ¿La caldera pirotubular que posición tiene y por qué?
5. ¿Cuántos minutos dura en llegar la caldera pirotubular a la presión de trabajo, desde su encendido?
6. Según su observación, mencione 5 partes fundamentales de la caldera pirotubular.
7. Desde su observación en la práctica, ¿cree que la caldera es óptima para el funcionamiento de los intercambiadores?
8. ¿Qué configuración manejan los intercambiadores de calor? Realice un dibujo
9. ¿Qué diferencia hay entre los tres tipos de intercambiadores de calor existentes en el laboratorio de termofluidos y cuál es el más eficiente?
10. ¿Considera usted que el trabajo de los intercambiadores es óptimo? Sustente su respuesta.
11. Realice un diagrama de flujo; explicando la corrida de los intercambiadores de calor
12. ¿Considera que el intercambiador de calor de placas (radiador) es un óptimo sistema de refrigeración? Sustente su respuesta y si tiene uno mejor postúlelo.

## CONCLUSIONES

El desarrollo de la presente tesis se ha centrado en proponer, crear y poner a punto un equipo que logre mantener la temperatura del agua fría que ingresa y realiza transferencia de calor en los intercambiadores que se encuentran acoplados a la caldera pirotubular ECCI 3 ubicada en el laboratorio de termofluidos. Con base a la tesis “Apreciación, modificación y adecuación de dos equipos de transferencia de calor existentes en desuso (tubos concéntricos, tubos y coraza) del laboratorio de termofluidos sede J, para acoplarlos a la caldera pirotubular miniatura ECCI 3” se evidenció la falencia del agua fría que circula por los intercambiadores de calor y al tener contacto con el vapor proveniente de la caldera, este líquido con temperatura ambiente, luego de un tiempo de 40 minutos de operación alcanzaba valores de temperatura elevada. Se permite así abordar el estudio en temas termodinámicos y de transferencia de calor para generar la solución por medio de un equipo y así poder aumentar la eficiencia de funcionamiento de los intercambiadores de calor actuales.

Para ello ha sido necesario como paso inicial realizar varias pruebas a la planta actual validando la forma de funcionamiento y verificando que los resultados sean los que tenía el trabajo anterior. A partir de los datos obtenidos se propusieron tres diferentes equipos que puedan realizar el trabajo de refrigeración y así poder mantener el agua en un rango establecido de temperatura para trabajar a 20°C.

Los equipos propuestos fueron en primera instancia un sistema de enfriamiento de agua o water chiller, tomando como base la temperatura del agua a la salida de los intercambiadores de 30°C y haciendo el cálculo con varios refrigerantes comerciales como R134a, R22, R407C y R422A y logrando refrigerar el agua a 15°C. Como segunda opción se desarrolló el proceso matemático de un tubo aletado comercial con longitud de 1 metro y 315 aletas de espesor de  $4 \times 10^{-4}$  m y de paso  $2.77 \times 10^{-3}$  m realizando el proceso de disminuir la temperatura del agua desde 30°C a 29.7°C con un coeficiente de convección natural y 21.18°C con un coeficiente de convección combinado. La última opción fue desarrollada con base al sistema de refrigeración que utilizan los vehículos, el radiador que está compuesto por 92 tubos con dimensiones de 800 mm de largo y 9 mm de alto con aletas de forma triangular de 9.17 mm y de paso 3.5 mm junto con un ventilador de 62.58 W a 3600 rpm que lograba disminuir la temperatura de 46°C a 18°C.

Con base a los datos recopilados y a la valoración que se dio en la Tabla 11 de comparación de los tres equipos, se observó que el radiador es la mejor opción, con una calificación de 90.3% sobre 100% debido a su eficiencia, costo y dimensión del diseño.

Realizando la prueba final con todas las mejoras realizadas, se demostró que el radiador mantiene la temperatura del agua. Se tomaron los datos de temperatura del agua a la entrada y a la salida de los intercambiadores de calor logrando

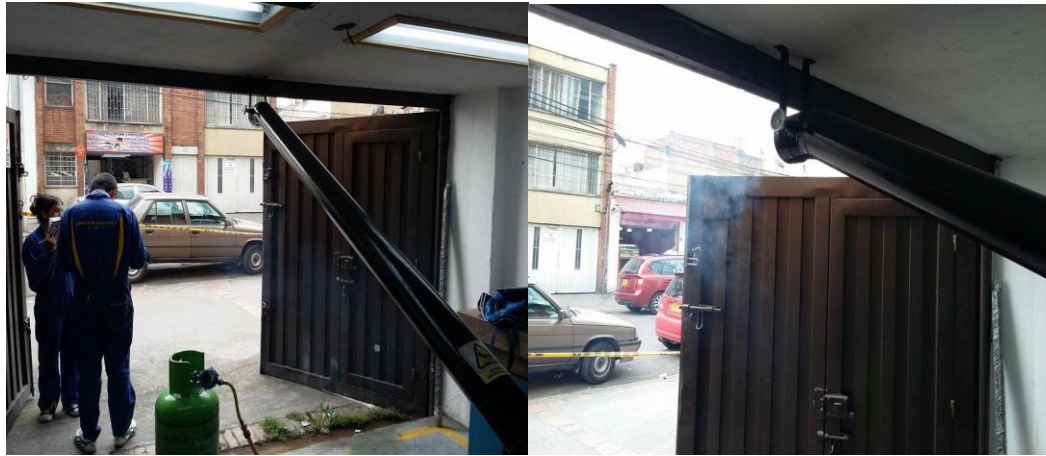
constatar que en 1 hora de trabajo la temperatura del agua ingresando a los intercambiadores es de 50°C y saliendo a 59°C, comparado con los resultados de la corrida final de la tesis anterior la cual en 40 minutos de trabajo la temperatura del agua a la entrada y salida de los intercambiadores era de 80°C.

En el momento de instalar los equipos. Se realizó una modificación con respecto a la tubería que acopla las salidas de los dos intercambiadores de calor hacia el tanque de depósito de agua fría, reduciendo las pérdidas por longitud de tubería. Se agregaron al tablero de comando un sistema de mando automatizado por medio de contactores, termostatos y flotadores para que el proceso de inicio de funcionamiento fuera más cómodo, poniendo en marcha automáticamente las bombas de agua fría y condensados como también del ventilador. Evidentemente no se logró la totalidad del objetivo por un error de selección al momento de realizar el montaje eléctrico, ya que en cálculos realizados se requería un ventilador de mínimo 3600 rpm para lograr la operación de disminuir la temperatura de aproximadamente 18°C al agua fría. Por la restricción eléctrica a 110 V para alimentar los ventiladores, se optó por montar dos ventiladores que trabajan en serie pero con menos revoluciones (1500 rpm) por las especificaciones que poseen, adicionalmente se agrega que al tener un tamaño de aspas mayor a 10 pulgadas los mismos motores pueden sufrir fallas de sobrecalentamiento y esto contribuyó a que no se lograra realizar un cubrimiento completo del radiador disminuyendo su eficiencia.

Para concluir se puede decir que el radiador diseñado y montado ha cumplido un 80% el objetivo general del proyecto, manteniendo la temperatura 30°C menos en 20 minutos más de operación comparado con el trabajo realizado en los intercambiadores de calor en la tesis anterior. Se recomienda seguir los cálculos de diseño del radiador, donde se asegura que el equipo realizara su función a plena carga con ventiladores que posean más de 3600rpm y aumentando el tamaño de aspas a más de 12 pulgadas, por lo cual es necesario realizar cambio de alimentación eléctrica a los ventiladores de 110 V a 220 V y así se garantizara la refrigeración del agua fría para prolongar las pruebas que se realicen en las asignaturas de termodinámica, transferencia de calor y maquinas térmicas.

## RECOMENDACIONES

- ✓ Se puede observar que en el momento encender la caldera, los gases quedan en el mismo recinto y se tienen que abrir las puertas, se les recomienda prologar el tubo de escape a una zona donde se evite que los gases tengan contacto directo con las personas o instalar un sistema de extracción de gases, similar a los instalados en talleres de motores.



*Figura 105. Problema de gas de combustión*

- ✓ Al momento de abrir l válvula 5 de distribuidor, se debe esperar 5 minutos para que el termostato 1 censé la temperatura en el tubo y se active la bomba 1, al verificar el funcionamiento en el tablero de mando con el testigo verde prendido y auditivamente con el funcionamiento de la bomba, abra lentamente la válvula 13 de entrada de vapor del intercambiador coraza tubos y seguir los pasos del manual de operación.
- ✓ Durante la fase de intercambio de calor, abstenerse de tocar los intercambiadores de calor ya que pueden encontrarse por convección vapor-acero- agua-acero a temperaturas aprox. de 60°C lo cual puede provocar quemaduras leves.

## REFERENCIA

- [1] <http://www.si3ea.gov.co/eure/6/inicio.html>.
- [2] <http://www.hard-h2o.com/review/radiadores/airplex-evo240.html>.
- [3] <https://termoaplicadaunefm.files.wordpress.com/2009/02/guia-tecnica-electiva1.pdf>.
- [4] <http://spanish.alibaba.com/product>.
- [5] <http://www.taringa.net/posts>.
- [6] <http://es.slideshare.net/gonguibri/sistema-de-refrigeracin-6744475>.
- [7] <http://consejos.oscaro.es/cambiar-termostato-automovil.html>.
- [8] <http://www.topciudades.com.br/HotSite/Site/cradiadores>.
- [9] <http://www.centraldelaire.es/ventiladores>.
- [10] <http://www.gizmos.es/motor/bomba-de-agua>.
- [11] <https://www.mann-hummel.com>.
- [12] <http://www.definicionabc.com/tecnologia/aire-acondicionado.php>.
- [13] <http://www.airservice.com.mx/>.
- [14] [http://www.elaireacondicionado.com/tipos\\_aire\\_acondicionado/](http://www.elaireacondicionado.com/tipos_aire_acondicionado/).
- [15] [http://www.kimikal.es/index.php?option=com\\_content&view=article&id=48&Itemid=56](http://www.kimikal.es/index.php?option=com_content&view=article&id=48&Itemid=56).
- [16] <http://www.si3ea.gov.co/Eure/11/inicio.html>.
- [17] <http://www.0grados.com.mx/torres-de-enfriamiento/>.
- [18] <http://lema.rae.es/drae/srv/search?key=radiador>.
- [19] <http://www.geocities.ws/mecanicainacap/refrigeracion.html>.
- [20] <http://www.taringa.net/posts/autos-motos/16640395/Los-Radiadores.html>.
- [21] [http://radiadores.com.ve/cw\\_site/1/link\\_3.php](http://radiadores.com.ve/cw_site/1/link_3.php).
- [22] <http://es.slideshare.net/gonguibri/sistema-de-refrigeracin-6744475>.
- [23] <http://www.geocities.ws/mecanicainacap/refrigeracion.html>.
- [24] <http://www.bossini-cristina.com/>.
- [25] <http://www.geocities.ws/mecanicainacap/refrigeracion.html>.
- [26] <http://www.velocidadmaxima.com/forum/archive/index.php/t-102145.html>.
- [27] <http://mecanicaini.mforos.com/1703821/11205048-sistema-de-enfriamiento-del-motor/>.
- [28] Y. A. Cengel, Transferencia de calor y masa ed.3, Mexico: Mc. Graw Hill, 2007.
- [29] <http://mecanicaini.mforos.com/1703821/11205048-sistema-de-enfriamiento-del-motor/>.
- [30] <http://www.bcebaltimore.org/new-trane-chiller-sets-industry-benchmark-for-energy-efficiency-and-sound-levels/>.
- [31] <http://www.ecochillers.com/Que-es-un-Chiller>.
- [32] [http://www.unet.edu.ve/~fenomeno/F\\_DE\\_T-152.htm](http://www.unet.edu.ve/~fenomeno/F_DE_T-152.htm).
- [33] J.P.Holman, Transferencia de Calor ed.10, Mexico: CECSA, 1999.

- [34] [http://www.esi2.us.es/~jfc/Descargas/TC/Coleccion\\_tablas\\_graficas\\_TC.pdf](http://www.esi2.us.es/~jfc/Descargas/TC/Coleccion_tablas_graficas_TC.pdf).
- [35] [http://www.esi2.us.es/~jfc/Descargas/TC/Coleccion\\_tablas\\_graficas\\_TC.pdf](http://www.esi2.us.es/~jfc/Descargas/TC/Coleccion_tablas_graficas_TC.pdf).
- [36] [http://books.google.com.co/books/about/Momentum\\_heat\\_and\\_mass\\_transfer.html?id=GcBTAAAMAAJ&redir\\_esc=y](http://books.google.com.co/books/about/Momentum_heat_and_mass_transfer.html?id=GcBTAAAMAAJ&redir_esc=y) .
- [37] <http://www.miliarium.com/Prontuario/Tablas/Quimica/PropiedadesTermicas.asp>.
- [38] R. L. Mott, Mecanica de Fluidos Aplicada ed. 4, Mexico: PEARSON, 1996.
- [39] <http://www.sogecal.com/la-caldera-kestahl/>.
- [40] <http://dostcoc.com>.
- [41] F. Marin, Thermoequipos C.A. pag.6.
- [42] <http://topintercambiadores.com>.
- [43] <http://topintercambiadores.com>.
- [44] «Manual de diseño de procesos de transferencia PDVSA».
- [45] «apreciación, modificación y adecuación de dos equipos de transferencia de calor existentes en desuso (tubos concéntricos, de tubos y coraza) del laboratorio de termo fluidos sede j, para acoplarlos a la caldera pirotubular miniatura ecci3».



## ANEXOS

Anexo 1. Tabla de valores de calor específico del agua

Calor específico del agua entre 0 °C y 100 °C

[www.vaxasoftware.com](http://www.vaxasoftware.com)

Temp. °C	Calor específico kJ K·kg	kcal K·kg	Temp. °C	Calor específico kJ K·kg	kcal K·kg	Temp. °C	Calor específico kJ K·kg	kcal K·kg
0 (hielo)	1,960	0,468	34	4,178	0,999	68	4,189	1,001
0	4,217	1,008	35	4,178	0,999	69	4,189	1,001
1	4,213	1,007	36	4,178	0,999	70	4,190	1,001
2	4,210	1,006	37	4,178	0,999	71	4,190	1,001
3	4,207	1,005	38	4,178	0,999	72	4,191	1,002
4	4,205	1,005	39	4,179	0,999	73	4,192	1,002
5	4,202	1,004	40	4,179	0,999	74	4,192	1,002
6	4,200	1,004	41	4,179	0,999	75	4,193	1,002
7	4,198	1,003	42	4,179	0,999	76	4,194	1,002
8	4,196	1,003	43	4,179	0,999	77	4,194	1,002
9	4,194	1,002	44	4,179	0,999	78	4,195	1,003
10	4,192	1,002	45	4,180	0,999	79	4,196	1,003
11	4,191	1,002	46	4,180	0,999	80	4,196	1,003
12	4,189	1,001	47	4,180	0,999	81	4,197	1,003
13	4,188	1,001	48	4,180	0,999	82	4,198	1,003
14	4,187	1,001	49	4,181	0,999	83	4,199	1,004
15	4,186	1,000	50	4,181	0,999	84	4,200	1,004
16	4,185	1,000	51	4,181	0,999	85	4,200	1,004
17	4,184	1,000	52	4,182	1,000	86	4,201	1,004
18	4,183	1,000	53	4,182	1,000	87	4,202	1,004
19	4,182	1,000	54	4,182	1,000	88	4,203	1,005
20	4,182	1,000	55	4,183	1,000	89	4,204	1,005
21	4,181	0,999	56	4,183	1,000	90	4,205	1,005
22	4,181	0,999	57	4,183	1,000	91	4,206	1,005
23	4,180	0,999	58	4,184	1,000	92	4,207	1,005
24	4,180	0,999	59	4,184	1,000	93	4,208	1,006
25	4,180	0,999	60	4,185	1,000	94	4,209	1,006
26	4,179	0,999	61	4,185	1,000	95	4,210	1,006
27	4,179	0,999	62	4,186	1,000	96	4,211	1,006
28	4,179	0,999	63	4,186	1,000	97	4,212	1,007
29	4,179	0,999	64	4,187	1,001	98	4,213	1,007
30	4,178	0,999	65	4,187	1,001	99	4,214	1,007
31	4,178	0,999	66	4,188	1,001	100	4,216	1,008
32	4,178	0,999	67	4,188	1,001	100 (gas)	2,080	0,497
33	4,178	0,999						

*Anexo 2. Tabla de valores para densidad del agua*

**Densidad del agua líquida entre 0 °C y 100 °C**

[www.vaxasoftware.com](http://www.vaxasoftware.com)

Presión externa: 1 atm = 101 325 Pa

Temperatura °C	Densidad kg / m <sup>3</sup>	Temperatura °C	Densidad kg / m <sup>3</sup>	Temperatura °C	Densidad kg / m <sup>3</sup>
0 (hielo)	917,00	33	994,78	67	979,34
0	999,82	34	994,43	68	978,78
1	999,89	35	994,08	69	978,21
2	999,94	36	993,73	70	977,63
3	999,98	37	993,37	71	977,05
4	1000,00	38	993,00	72	976,47
5	1000,00	39	992,63	73	975,88
6	999,99	40	992,25	74	975,28
7	999,96	41	991,86	75	974,68
8	999,91	42	991,46	76	974,08
9	999,85	43	991,05	77	973,46
10	999,77	44	990,64	78	972,85
11	999,68	45	990,22	79	972,23
12	999,58	46	989,80	80	971,60
13	999,46	47	989,38	81	970,97
14	999,33	48	988,92	82	970,33
15	999,19	49	988,47	83	969,69
16	999,03	50	988,02	84	969,04
17	998,86	51	987,56	85	968,39
18	998,68	52	987,09	86	967,73
19	998,49	53	986,62	87	967,07
20	998,29	54	986,14	88	966,41
21	998,08	55	985,65	89	965,74
22	997,86	56	985,16	90	965,06
23	997,62	57	984,66	91	964,38
24	997,38	58	984,16	92	963,70
25	997,13	59	983,64	93	963,01
26	996,86	60	983,13	94	962,31
27	996,59	61	982,60	95	961,62
28	996,31	62	982,07	96	960,91
29	996,02	63	981,54	97	960,20
30	995,71	64	981,00	98	959,49
31	995,41	65	980,45	99	958,78
32	995,09	66	979,90	100	958,05

**Anexo 3. Tabla termodinámica de propiedades saturadas refrigerante R-407C para 10°C**

**TABLE 1** (continued)  
**Suva® 407C Saturation Properties—Temperature Table**

TEMP. °C	PRESSURE kPa		VOLUME m <sup>3</sup> /kg		DENSITY kg/m <sup>3</sup>		ENTHALPY kJ/kg			ENTROPY kJ/(kg)(K)		TEMP. °C
	LIQUID pf	VAPOR pg	LIQUID vf	VAPOR vg	LIQUID 1/vf	VAPOR 1/vg	LIQUID hf	LATENT hfg	VAPOR hg	LIQUID sf	VAPOR sg	
-40	119.7	85.0	0.0007	0.2577	1378.9	3.880	146.6	242.9	389.5	0.7903	1.8487	-40
-39	125.3	89.3	0.0007	0.2460	1375.4	4.065	147.9	242.3	390.2	0.7957	1.8468	-39
-38	131.1	93.8	0.0007	0.2349	1371.9	4.257	149.1	241.7	390.8	0.8011	1.8449	-38
-37	137.1	98.5	0.0007	0.2244	1368.3	4.456	150.4	241.0	391.4	0.8064	1.8430	-37
-36	143.3	103.4	0.0007	0.2145	1364.8	4.662	151.7	240.4	392.1	0.8118	1.8412	-36
-35	149.8	108.5	0.0007	0.2051	1361.3	4.876	153.2	239.5	392.7	0.8184	1.8394	-35
-34	156.4	113.8	0.0007	0.1962	1357.7	5.098	154.5	238.8	393.4	0.8237	1.8377	-34
-33	163.3	119.2	0.0007	0.1877	1354.2	5.327	155.8	238.2	394.0	0.8290	1.8360	-33
-32	170.5	124.9	0.0007	0.1797	1350.6	5.564	157.1	237.6	394.6	0.8343	1.8343	-32
-31	177.8	130.8	0.0007	0.1721	1347.1	5.810	158.3	236.9	395.3	0.8396	1.8326	-31
-30	185.5	136.9	0.0007	0.1649	1343.5	6.064	159.6	236.3	395.9	0.8448	1.8310	-30
-29	193.3	143.2	0.0007	0.1580	1339.9	6.327	160.9	235.6	396.5	0.8501	1.8294	-29
-28	201.5	149.8	0.0007	0.1515	1336.3	6.599	162.2	234.9	397.2	0.8554	1.8278	-28
-27	209.9	156.5	0.0008	0.1453	1332.7	6.880	163.3	234.5	397.8	0.8596	1.8263	-27
-26	218.6	163.6	0.0008	0.1394	1329.2	7.171	164.4	234.0	398.4	0.8643	1.8248	-26
-25	227.6	170.9	0.0008	0.1338	1325.6	7.472	165.7	233.3	399.0	0.8696	1.8233	-25
-24	236.8	178.4	0.0008	0.1285	1322.0	7.782	167.1	232.6	399.7	0.8748	1.8218	-24
-23	246.3	186.2	0.0008	0.1234	1318.3	8.102	168.4	231.9	400.3	0.8801	1.8204	-23
-22	256.2	194.2	0.0008	0.1186	1314.7	8.433	169.7	231.2	400.9	0.8854	1.8189	-22
-21	266.3	202.6	0.0008	0.1140	1311.1	8.775	171.0	230.5	401.5	0.8907	1.8176	-21
-20	276.8	211.2	0.0008	0.1096	1307.5	9.127	172.4	229.7	402.1	0.8959	1.8162	-20
-19	287.5	220.1	0.0008	0.1054	1303.8	9.491	173.7	229.0	402.7	0.9012	1.8148	-19
-18	298.6	229.2	0.0008	0.1014	1300.2	9.866	175.1	228.3	403.4	0.9064	1.8135	-18
-17	310.0	238.7	0.0008	0.0975	1296.5	10.253	176.4	227.5	404.0	0.9117	1.8122	-17
-16	321.8	248.5	0.0008	0.0939	1292.9	10.651	177.8	226.8	404.6	0.9169	1.8109	-16
-15	333.8	258.6	0.0008	0.0904	1289.2	11.062	179.1	226.0	405.2	0.9221	1.8097	-15
-14	346.3	269.0	0.0008	0.0871	1285.5	11.486	180.5	225.3	405.8	0.9274	1.8084	-14
-13	359.0	279.7	0.0008	0.0839	1281.9	11.923	181.9	224.5	406.4	0.9326	1.8072	-13
-12	372.2	290.8	0.0008	0.0808	1278.2	12.372	183.2	223.7	407.0	0.9378	1.8060	-12
-11	385.7	302.2	0.0008	0.0779	1274.5	12.835	184.5	223.1	407.6	0.9425	1.8048	-11
-10	399.6	313.9	0.0008	0.0751	1270.8	13.313	185.9	222.3	408.2	0.9478	1.8037	-10
-9	413.8	326.0	0.0008	0.0724	1267.1	13.804	187.3	221.5	408.8	0.9530	1.8025	-9
-8	428.5	338.5	0.0008	0.0699	1263.3	14.311	188.7	220.7	409.3	0.9582	1.8014	-8
-7	443.5	351.3	0.0008	0.0674	1259.6	14.831	190.1	219.9	409.9	0.9635	1.8003	-7
-6	458.9	364.5	0.0008	0.0651	1255.9	15.368	191.5	219.0	410.5	0.9687	1.7992	-6
-5	474.8	378.1	0.0008	0.0628	1252.1	15.919	192.9	218.2	411.1	0.9739	1.7981	-5
-4	491.0	392.1	0.0008	0.0607	1248.4	16.487	194.3	217.4	411.7	0.9791	1.7970	-4
-3	507.7	406.5	0.0008	0.0586	1244.6	17.071	195.7	216.5	412.2	0.9843	1.7959	-3
-2	524.8	421.2	0.0008	0.0566	1240.8	17.671	197.1	215.7	412.8	0.9896	1.7949	-2
-1	542.3	436.4	0.0008	0.0547	1237.0	18.289	198.6	214.8	413.4	0.9948	1.7938	-1
0	560.3	452.0	0.0008	0.0528	1233.2	18.924	200.0	213.9	413.9	1.0000	1.7928	0
1	578.7	468.0	0.0008	0.0511	1229.4	19.577	201.4	213.0	414.5	1.0052	1.7918	1
2	597.6	484.5	0.0008	0.0494	1225.6	20.249	202.9	212.1	415.0	1.0104	1.7908	2
3	616.9	501.4	0.0008	0.0478	1221.8	20.939	204.3	211.2	415.6	1.0156	1.7898	3
4	636.7	518.7	0.0008	0.0462	1217.9	21.649	205.8	210.3	416.1	1.0209	1.7888	4
5	657.0	536.6	0.0008	0.0447	1214.1	22.378	207.3	209.4	416.6	1.0261	1.7879	5
6	677.8	554.8	0.0008	0.0432	1210.2	23.127	208.7	208.4	417.2	1.0313	1.7869	6
7	699.0	573.6	0.0008	0.0418	1206.3	23.898	210.2	207.5	417.7	1.0365	1.7859	7
8	720.8	592.8	0.0008	0.0405	1202.4	24.689	211.7	206.5	418.2	1.0418	1.7850	8
9	743.0	612.5	0.0008	0.0392	1198.5	25.502	213.2	205.6	418.8	1.0470	1.7841	9
10	765.8	632.8	0.0008	0.0380	1194.6	26.338	214.7	204.6	419.3	1.0522	1.7831	10
11	789.1	653.5	0.0008	0.0368	1190.7	27.196	216.2	203.6	419.8	1.0574	1.7822	11
12	812.9	674.7	0.0008	0.0356	1186.8	28.078	217.7	202.6	420.3	1.0627	1.7813	12
13	837.3	696.5	0.0008	0.0345	1182.8	28.984	219.2	201.6	420.8	1.0679	1.7804	13
14	862.2	718.8	0.0008	0.0334	1178.8	29.914	220.8	200.5	421.3	1.0732	1.7794	14
15	887.6	741.7	0.0009	0.0324	1174.8	30.870	222.3	199.5	421.8	1.0784	1.7785	15
16	913.6	765.1	0.0009	0.0314	1170.8	31.852	223.8	198.4	422.3	1.0837	1.7776	16
17	940.2	789.1	0.0009	0.0304	1166.8	32.860	225.4	197.4	422.7	1.0889	1.7767	17
18	967.3	813.6	0.0009	0.0295	1162.8	33.896	226.9	196.3	423.2	1.0942	1.7758	18
19	995.1	838.7	0.0009	0.0286	1158.7	34.960	228.5	195.2	423.7	1.0995	1.7749	19



**Anexo 4. Tabla termodinámica propiedades saturadas refrigerante R-407C para 73°C y 74°C**

**TABLE 1** (continued)  
**Suva® 407C Saturation Properties—Temperature Table**

TEMP. °C	PRESSURE kPa		VOLUME m <sup>3</sup> /kg		DENSITY kg/m <sup>3</sup>		ENTHALPY kJ/kg			ENTROPY kJ/(kg)(K)		TEMP. °C
	LIQUID pf	VAPOR pg	LIQUID vf	VAPOR vg	LIQUID 1/vf	VAPOR 1/vg	LIQUID hf	LATENT hfg	VAPOR hg	LIQUID sf	VAPOR sg	
20	1023.4	864.4	0.0009	0.0277	1154.7	36.052	230.1	194.1	424.1	1.1047	1.7740	20
21	1052.3	890.7	0.0009	0.0269	1150.6	37.175	231.6	193.0	424.6	1.1100	1.7731	21
22	1081.8	917.6	0.0009	0.0261	1146.5	38.328	233.2	191.8	425.1	1.1153	1.7722	22
23	1112.0	945.1	0.0009	0.0253	1142.3	39.512	234.8	190.7	425.5	1.1206	1.7713	23
24	1142.7	973.3	0.0009	0.0246	1138.2	40.728	236.4	189.5	425.9	1.1259	1.7704	24
25	1174.1	1002.1	0.0009	0.0238	1134.0	41.977	238.0	188.3	426.4	1.1312	1.7695	25
26	1206.1	1031.5	0.0009	0.0231	1129.9	43.261	239.7	187.1	426.8	1.1366	1.7686	26
27	1238.8	1061.6	0.0009	0.0224	1125.6	44.579	241.3	185.9	427.2	1.1419	1.7677	27
28	1272.1	1092.3	0.0009	0.0218	1121.4	45.934	242.9	184.7	427.6	1.1473	1.7668	28
29	1306.0	1123.7	0.0009	0.0211	1117.2	47.325	244.6	183.4	428.0	1.1526	1.7659	29
30	1340.7	1155.9	0.0009	0.0205	1112.9	48.755	246.2	182.1	428.4	1.1580	1.7649	30
31	1376.0	1188.7	0.0009	0.0199	1108.6	50.225	247.9	180.8	428.7	1.1634	1.7640	31
32	1412.0	1222.2	0.0009	0.0193	1104.3	51.735	249.6	179.5	429.1	1.1688	1.7630	32
33	1448.7	1256.4	0.0009	0.0188	1099.9	53.287	251.3	178.2	429.5	1.1742	1.7621	33
34	1486.1	1291.4	0.0009	0.0182	1095.5	54.883	253.0	176.9	429.8	1.1796	1.7611	34
35	1524.2	1327.1	0.0009	0.0177	1091.1	56.523	254.7	175.5	430.2	1.1850	1.7602	35
36	1563.0	1363.5	0.0009	0.0172	1086.7	58.209	256.4	174.1	430.5	1.1905	1.7592	36
37	1602.5	1400.7	0.0009	0.0167	1082.2	59.943	258.1	172.7	430.8	1.1959	1.7582	37
38	1642.8	1438.7	0.0009	0.0162	1077.7	61.726	259.9	171.3	431.1	1.2014	1.7572	38
39	1683.8	1477.5	0.0009	0.0157	1073.2	63.561	261.6	169.8	431.4	1.2069	1.7562	39
40	1725.5	1517.0	0.0009	0.0153	1068.6	65.448	263.4	168.3	431.7	1.2125	1.7551	40
41	1768.0	1557.4	0.0009	0.0148	1064.0	67.390	265.2	166.8	432.0	1.2180	1.7541	41
42	1811.3	1598.6	0.0009	0.0144	1059.4	69.388	267.0	165.3	432.3	1.2236	1.7530	42
43	1855.3	1640.6	0.0009	0.0140	1054.7	71.446	268.8	163.7	432.5	1.2292	1.7519	43
44	1900.2	1683.5	0.0010	0.0136	1050.0	73.565	270.6	162.2	432.8	1.2348	1.7508	44
45	1945.8	1727.2	0.0010	0.0132	1045.2	75.747	272.5	160.5	433.0	1.2404	1.7497	45
46	1992.2	1771.7	0.0010	0.0128	1040.4	77.994	274.3	158.9	433.2	1.2461	1.7485	46
47	2039.4	1817.2	0.0010	0.0125	1035.5	80.311	276.2	157.2	433.4	1.2517	1.7474	47
48	2087.4	1863.5	0.0010	0.0121	1030.6	82.699	278.1	155.5	433.6	1.2575	1.7462	48
49	2136.2	1910.8	0.0010	0.0117	1025.7	85.161	280.0	153.8	433.8	1.2632	1.7449	49
50	2185.9	1959.0	0.0010	0.0114	1020.7	87.701	281.9	152.0	433.9	1.2690	1.7437	50
51	2236.4	2008.1	0.0010	0.0111	1015.6	90.321	283.8	150.2	434.1	1.2748	1.7424	51
52	2287.7	2058.1	0.0010	0.0107	1010.5	93.027	285.8	148.4	434.2	1.2806	1.7411	52
53	2339.9	2109.1	0.0010	0.0104	1005.3	95.820	287.7	146.5	434.3	1.2865	1.7397	53
54	2392.9	2161.1	0.0010	0.0101	1000.0	98.707	289.7	144.6	434.4	1.2924	1.7384	54
55	2446.8	2214.1	0.0010	0.0098	994.7	101.691	291.7	142.7	434.4	1.2984	1.7369	55
56	2501.6	2268.1	0.0010	0.0095	989.3	104.777	293.8	140.7	434.5	1.3044	1.7355	56
57	2557.3	2323.1	0.0010	0.0093	983.8	107.970	295.8	138.6	434.5	1.3105	1.7340	57
58	2613.8	2379.1	0.0010	0.0090	978.2	111.277	297.9	136.6	434.5	1.3166	1.7324	58
59	2671.2	2436.2	0.0010	0.0087	972.6	114.703	300.0	134.4	434.4	1.3227	1.7308	59
60	2729.5	2494.4	0.0010	0.0085	966.8	118.255	302.2	132.2	434.4	1.3289	1.7291	60
61	2788.7	2553.6	0.0010	0.0082	961.0	121.941	304.3	130.0	434.3	1.3352	1.7274	61
62	2848.8	2614.0	0.0010	0.0080	955.0	125.768	306.5	127.7	434.2	1.3415	1.7256	62
63	2909.9	2675.4	0.0011	0.0077	948.9	129.746	308.7	125.3	434.1	1.3479	1.7238	63
64	2971.8	2738.0	0.0011	0.0075	942.7	133.884	311.0	122.9	433.9	1.3544	1.7219	64
65	3034.7	2801.8	0.0011	0.0072	936.3	138.194	313.3	120.4	433.7	1.3609	1.7199	65
66	3098.5	2866.8	0.0011	0.0070	929.8	142.687	315.6	117.9	433.5	1.3675	1.7178	66
67	3163.2	2932.9	0.0011	0.0068	923.2	147.378	318.0	115.2	433.2	1.3743	1.7157	67
68	3228.8	3000.3	0.0011	0.0066	916.3	152.282	320.4	112.5	432.9	1.3811	1.7134	68
69	3295.4	3068.9	0.0011	0.0064	909.3	157.416	322.8	109.7	432.5	1.3880	1.7111	69
70	3362.9	3138.8	0.0011	0.0061	902.0	162.800	325.3	106.8	432.1	1.3950	1.7086	70
71	3431.3	3210.1	0.0011	0.0059	894.5	168.458	327.9	103.8	431.6	1.4022	1.7060	71
72	3500.6	3282.6	0.0011	0.0057	886.7	174.415	330.5	100.6	431.1	1.4095	1.7033	72
73	3570.8	3356.5	0.0011	0.0055	878.6	180.703	333.1	97.4	430.5	1.4169	1.7004	73
74	3642.0	3431.8	0.0011	0.0053	870.1	187.358	335.9	94.0	429.9	1.4246	1.6973	74
75	3714.0	3508.6	0.0012	0.0051	861.3	194.425	338.7	90.4	429.2	1.4324	1.6941	75
76	3786.9	3586.9	0.0012	0.0050	852.0	201.958	341.6	86.7	428.3	1.4404	1.6906	76
77	3860.6	3666.7	0.0012	0.0048	842.1	210.021	344.6	82.8	427.4	1.4487	1.6869	77
78	3935.2	3748.1	0.0012	0.0046	831.6	218.698	347.8	78.6	426.4	1.4573	1.6829	78
79	4010.5	3831.1	0.0012	0.0044	820.3	228.096	351.0	74.2	425.2	1.4663	1.6785	79

**Anexo 5. Tablas termodinámicas vapor sobrecalentado refrigerante R-407 a 3600°C y 3800°C**

**TABLE 2 (continued)**  
**Suva® 407C Superheated Vapor—Constant Pressure Tables**

V = Volume in m<sup>3</sup>/kg    H = Enthalpy in kJ/kg    S = Entropy in kJ/(kg) (K)    (Saturation Properties in parentheses)

ABSOLUTE PRESSURE, kPa													TEMP. °C
TEMP. °C	2600.0			2800.0			3000.0			3200.0			
	(61.80°C)			(65.00°C)			(68.00°C)			(70.90°C)			
	V	H	S	V	H	S	V	H	S	V	H	S	
	(0.0080)	(434.2)	(1.7261)	(0.0072)	(433.7)	(1.7200)	(0.0066)	(432.9)	(1.7134)	(0.0060)	(431.7)	(1.7064)	
65	0.0083	438.6	1.7390	0.0073	433.8	1.7201	—	—	—	—	—	—	65
70	0.0087	445.0	1.7578	0.0077	440.8	1.7409	0.0068	436.0	1.7226	—	—	—	70
75	0.0091	451.2	1.7758	0.0081	447.5	1.7601	0.0072	443.3	1.7438	0.0064	438.6	1.7262	75
80	0.0095	457.2	1.7930	0.0085	453.8	1.7782	0.0076	450.1	1.7632	0.0068	446.1	1.7476	80
85	0.0099	463.1	1.8096	0.0089	460.0	1.7956	0.0080	456.7	1.7816	0.0072	453.0	1.7672	85
90	0.0102	469.0	1.8257	0.0092	466.0	1.8124	0.0083	463.0	1.7991	0.0075	459.7	1.7857	90
95	0.0106	474.7	1.8414	0.0095	472.0	1.8286	0.0087	469.1	1.8159	0.0079	466.1	1.8033	95
100	0.0109	480.4	1.8568	0.0099	477.8	1.8444	0.0090	475.2	1.8322	0.0082	472.4	1.8202	100
105	0.0112	486.1	1.8719	0.0102	483.6	1.8598	0.0093	481.1	1.8481	0.0085	478.5	1.8365	105
110	0.0115	491.7	1.8867	0.0104	489.4	1.8750	0.0095	487.0	1.8636	0.0088	484.6	1.8524	110
115	0.0118	497.3	1.9012	0.0107	495.1	1.8898	0.0098	492.9	1.8787	0.0090	490.6	1.8679	115
120	0.0121	502.9	1.9156	0.0110	500.8	1.9044	0.0101	498.7	1.8936	0.0093	496.5	1.8831	120
125	0.0123	508.5	1.9297	0.0113	506.5	1.9188	0.0104	504.5	1.9082	0.0095	502.4	1.8980	125
130	0.0126	514.1	1.9437	0.0115	512.2	1.9329	0.0106	510.2	1.9226	0.0098	508.2	1.9126	130
135	0.0129	519.7	1.9574	0.0118	517.8	1.9469	0.0109	516.0	1.9368	0.0100	514.1	1.9270	135
140	0.0132	525.3	1.9711	0.0121	523.5	1.9607	0.0111	521.7	1.9507	0.0103	519.9	1.9411	140
145	0.0134	530.9	1.9845	0.0123	529.2	1.9743	0.0114	527.4	1.9645	0.0105	525.7	1.9551	145
150	0.0137	536.5	1.9979	0.0126	534.8	1.9878	0.0116	533.2	1.9781	0.0107	531.5	1.9689	150
155	0.0139	542.1	2.0111	0.0128	540.5	2.0011	0.0118	538.9	1.9916	0.0110	537.3	1.9825	155
160	0.0142	547.7	2.0242	0.0130	546.2	2.0143	0.0121	544.6	2.0049	0.0112	543.1	1.9960	160
165	0.0144	553.4	2.0371	0.0133	551.9	2.0274	0.0123	550.4	2.0181	0.0114	548.9	2.0093	165
170	0.0147	559.0	2.0500	0.0135	557.6	2.0403	0.0125	556.1	2.0312	0.0116	554.7	2.0224	170
175	0.0149	564.7	2.0627	0.0138	563.3	2.0532	0.0127	561.9	2.0441	0.0118	560.5	2.0355	175
180	0.0152	570.4	2.0753	0.0140	569.1	2.0659	0.0129	567.7	2.0569	0.0120	566.3	2.0484	180
185	0.0154	576.1	2.0878	0.0142	574.8	2.0785	0.0132	573.5	2.0696	0.0122	572.1	2.0612	185
190	0.0157	581.8	2.1003	0.0144	580.6	2.0910	0.0134	579.3	2.0822	0.0125	578.0	2.0738	190
195	0.0159	587.6	2.1126	0.0147	586.3	2.1034	0.0136	585.1	2.0947	0.0127	583.8	2.0864	195
200	0.0161	593.3	2.1248	0.0149	592.1	2.1157	0.0138	590.9	2.1071	0.0129	589.7	2.0989	200
205	0.0164	599.1	2.1370	0.0151	597.9	2.1279	0.0140	596.8	2.1194	0.0131	595.6	2.1112	205
210	0.0166	604.9	2.1491	0.0153	603.8	2.1401	0.0142	602.6	2.1316	0.0133	601.5	2.1235	210
215	0.0168	610.7	2.1610	0.0155	609.6	2.1521	0.0144	608.5	2.1437	0.0135	607.4	2.1357	215
220	—	—	—	—	—	—	0.0146	614.4	2.1557	0.0136	613.3	2.1477	220
225	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.0138	619.2	2.1597	225

TEMP. °C	3400.0			3600.0			3800.0			4000.0			TEMP. °C
	(73.60°C)			(76.20°C)			(71.00°C)			(81.00°C)			
	V	H	S	V	H	S	V	H	S	V	H	S	
	(0.0054)	(430.2)	(1.6986)	(0.0049)	(428.2)	(1.6900)	(0.0013)	(327.0)	(1.3981)	(0.0040)	(422.4)	(1.6686)	
75	0.0056	432.9	1.7065	0.0035	407.3	1.6276	—	—	—	—	—	—	75
80	0.0061	441.5	1.7309	0.0054	436.0	1.7123	0.0046	429.2	1.6901	—	—	—	80
85	0.0065	449.1	1.7523	0.0058	444.6	1.7365	0.0052	439.5	1.7192	0.0046	433.4	1.6993	85
90	0.0068	456.2	1.7720	0.0062	452.3	1.7579	0.0056	448.1	1.7430	0.0050	443.4	1.7270	90
95	0.0072	462.9	1.7905	0.0065	459.5	1.7776	0.0060	455.9	1.7642	0.0054	451.9	1.7503	95
100	0.0075	469.5	1.8081	0.0068	466.4	1.7960	0.0063	463.1	1.7837	0.0058	459.6	1.7711	100
105	0.0078	475.8	1.8250	0.0071	473.0	1.8136	0.0066	470.0	1.8021	0.0061	466.9	1.7905	105
110	0.0081	482.1	1.8414	0.0074	479.4	1.8305	0.0069	476.7	1.8196	0.0063	473.8	1.8087	110
115	0.0083	488.2	1.8573	0.0077	485.7	1.8469	0.0071	483.2	1.8365	0.0066	480.5	1.8262	115
120	0.0086	494.2	1.8728	0.0079	491.9	1.8628	0.0074	489.5	1.8528	0.0069	487.1	1.8429	120
125	0.0088	500.2	1.8880	0.0082	498.1	1.8782	0.0076	495.8	1.8687	0.0071	493.5	1.8592	125
130	0.0091	506.2	1.9029	0.0084	504.1	1.8934	0.0079	502.0	1.8841	0.0073	499.8	1.8750	130
135	0.0093	512.1	1.9175	0.0087	510.2	1.9083	0.0081	508.1	1.8992	0.0076	506.1	1.8904	135
140	0.0095	518.0	1.9319	0.0089	516.1	1.9228	0.0083	514.2	1.9140	0.0078	512.3	1.9054	140
145	0.0098	523.9	1.9460	0.0091	522.1	1.9372	0.0085	520.3	1.9286	0.0080	518.4	1.9202	145
150	0.0100	529.8	1.9600	0.0093	528.0	1.9513	0.0087	526.3	1.9429	0.0082	524.5	1.9347	150
155	0.0102	535.6	1.9737	0.0095	534.0	1.9652	0.0089	532.3	1.9570	0.0084	530.6	1.9490	155
160	0.0104	541.5	1.9873	0.0097	539.9	1.9790	0.0091	538.3	1.9709	0.0086	536.6	1.9630	160
165	0.0106	547.3	2.0007	0.0099	545.8	1.9925	0.0093	544.2	1.9846	0.0088	542.7	1.9769	165
170	0.0108	553.2	2.0140	0.0101	551.7	2.0059	0.0095	550.2	1.9981	0.0090	548.7	1.9906	170
175	0.0110	559.1	2.0272	0.0103	557.6	2.0192	0.0097	556.2	2.0115	0.0091	554.7	2.0040	175
180	0.0112	564.9	2.0402	0.0105	563.5	2.0323	0.0099	562.1	2.0247	0.0093	560.7	2.0174	180
185	0.0114	570.8	2.0531	0.0107	569.4	2.0453	0.0101	568.1	2.0378	0.0095	566.7	2.0306	185
190	0.0116	576.7	2.0658	0.0109	575.4	2.0582	0.0103	574.1	2.0508	0.0097	572.7	2.0436	190
195	0.0118	582.6	2.0785	0.0111	581.3	2.0709	0.0104	580.0	2.0636	0.0099	578.7	2.0565	195
200	0.0120	588.5	2.0910	0.0113	587.2	2.0835	0.0106	586.0	2.0763	0.0100	584.8	2.0693	200
205	0.0122	594.4	2.1035	0.0115	593.2	2.0960	0.0108	592.0	2.0889	0.0102	590.8	2.0820	205
210	0.0124	600.3	2.1158	0.0117	599.1	2.1084	0.0110	598.0	2.1013	0.0104	596.8	2.0945	210
215	0.0126	606.2	2.1280	0.0118	605.1	2.1207	0.0111	604.0	2.1137	0.0105	602.9	2.1069	215
220	0.0128	612.2	2.1402	0.0120	611.1	2.1329	0.0113	610.0	2.1260	0.0107	608.9	2.1193	220
225	0.0130	618.2	2.1522	0.0122	617.1	2.1450	0.0115	616.0	2.1381	0.0109	615.0	2.1315	225
230	—	—	—	—	—	—	0.0124	623.1	2.1570	0.0110	621.0	2.1436	230
235	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.0112	627.1	2.1556	235



**Anexo 6. Tabla termodinámica propiedades saturadas refrigerante R-422<sup>a</sup> para 15°C, 59°C y 60°C**

**Table 1 (continued)**  
**DuPont™ ISCEON® MO79 (R-422A) Saturation Properties—Temperature Table**

TEMP. °C	PRESSURE (kPa)		VOLUME (m <sup>3</sup> /kg)		DENSITY (kg/m <sup>3</sup> )		ENTHALPY (kJ/kg)			ENTROPY (kJ/K·kg)		TEMP. °C
	LIQUID	VAPOUR	LIQUID v <sub>l</sub>	VAPOUR v <sub>g</sub>	LIQUID d <sub>l</sub>	VAPOUR d <sub>g</sub>	LIQUID h <sub>l</sub>	LATENT h <sub>lg</sub>	VAPOUR h <sub>g</sub>	LIQUID s <sub>l</sub>	VAPOUR s <sub>g</sub>	
15	971.2	930.8	0.0008	0.0182	1185.7	55.005	220.0	131.8	351.9	1.0704	1.5294	15
16	998.9	958.0	0.0008	0.0176	1180.9	56.707	221.4	130.9	352.3	1.0750	1.5292	16
17	1027.2	985.9	0.0009	0.0171	1176.1	58.457	222.8	130.0	352.7	1.0797	1.5290	17
18	1056.1	1014.3	0.0009	0.0166	1171.2	60.256	224.2	129.0	353.2	1.0844	1.5288	18
19	1085.6	1043.3	0.0009	0.0161	1166.3	62.105	225.6	128.0	353.6	1.0891	1.5286	19
20	1115.7	1073.0	0.0009	0.0156	1161.3	64.005	227.0	127.0	354.0	1.0938	1.5284	20
21	1146.4	1103.3	0.0009	0.0152	1156.3	65.959	228.4	126.0	354.4	1.0985	1.5282	21
22	1177.8	1134.2	0.0009	0.0147	1151.2	67.968	229.8	125.0	354.8	1.1031	1.5280	22
23	1209.8	1165.8	0.0009	0.0143	1146.1	70.035	231.2	124.0	355.2	1.1078	1.5277	23
24	1242.4	1198.0	0.0009	0.0139	1140.9	72.160	232.6	122.9	355.6	1.1125	1.5275	24
25	1275.7	1230.8	0.0009	0.0135	1135.6	74.347	234.0	121.9	355.9	1.1172	1.5272	25
26	1309.6	1264.4	0.0009	0.0131	1130.3	76.597	235.5	120.8	356.3	1.1219	1.5269	26
27	1344.2	1298.6	0.0009	0.0127	1124.9	78.912	236.9	119.7	356.7	1.1266	1.5267	27
28	1379.5	1333.5	0.0009	0.0123	1119.5	81.296	238.4	118.6	357.0	1.1314	1.5264	28
29	1415.4	1369.1	0.0009	0.0119	1113.9	83.750	239.8	117.5	357.3	1.1361	1.5261	29
30	1452.1	1405.4	0.0009	0.0116	1108.3	86.278	241.3	116.4	357.7	1.1408	1.5257	30
31	1489.5	1442.4	0.0009	0.0113	1102.6	88.881	242.8	115.2	358.0	1.1455	1.5254	31
32	1527.5	1480.2	0.0009	0.0109	1096.9	91.564	244.2	114.1	358.3	1.1503	1.5250	32
33	1566.3	1518.7	0.0009	0.0106	1091.0	94.330	245.7	112.9	358.6	1.1550	1.5246	33
34	1605.9	1557.9	0.0009	0.0103	1085.1	97.182	247.2	111.7	358.9	1.1598	1.5242	34
35	1646.1	1597.9	0.0009	0.0100	1079.1	100.120	248.7	110.4	359.1	1.1646	1.5238	35
36	1687.2	1638.7	0.0009	0.0097	1073.0	103.160	250.2	109.2	359.4	1.1694	1.5234	36
37	1728.9	1680.2	0.0009	0.0094	1066.7	106.290	251.8	107.9	359.7	1.1742	1.5229	37
38	1771.5	1722.6	0.0009	0.0091	1060.4	109.530	253.3	106.6	359.9	1.1790	1.5224	38
39	1814.8	1765.7	0.0009	0.0089	1054.0	112.870	254.9	105.3	360.1	1.1838	1.5219	39
40	1858.9	1809.7	0.0010	0.0086	1047.4	116.330	256.4	103.9	360.3	1.1886	1.5213	40
41	1903.9	1854.4	0.0010	0.0083	1040.8	119.910	258.0	102.6	360.5	1.1935	1.5207	41
42	1949.6	1900.0	0.0010	0.0081	1034.0	123.610	259.6	101.2	360.7	1.1984	1.5201	42
43	1996.2	1946.5	0.0010	0.0078	1027.0	127.450	261.1	99.7	360.9	1.2033	1.5194	43
44	2043.6	1993.8	0.0010	0.0076	1020.0	131.420	262.8	98.3	361.0	1.2082	1.5187	44
45	2091.8	2042.0	0.0010	0.0074	1012.7	135.550	264.4	96.8	361.1	1.2132	1.5180	45
46	2140.9	2091.1	0.0010	0.0072	1005.3	139.830	266.0	95.2	361.2	1.2181	1.5172	46
47	2190.9	2141.1	0.0010	0.0069	997.8	144.280	267.7	93.7	361.3	1.2232	1.5164	47
48	2241.8	2192.0	0.0010	0.0067	990.1	148.910	269.3	92.1	361.4	1.2282	1.5155	48
49	2293.5	2243.9	0.0010	0.0065	982.1	153.740	271.0	90.4	361.4	1.2333	1.5145	49
50	2346.2	2296.7	0.0010	0.0063	974.0	158.770	272.7	88.7	361.4	1.2384	1.5135	50
51	2399.8	2350.5	0.0010	0.0061	965.6	164.020	274.4	87.0	361.4	1.2435	1.5124	51
52	2454.3	2405.2	0.0010	0.0059	957.0	169.520	276.2	85.2	361.4	1.2487	1.5113	52
53	2509.8	2461.0	0.0011	0.0057	948.1	175.280	277.9	83.4	361.3	1.2540	1.5101	53
54	2566.2	2517.8	0.0011	0.0055	938.9	181.320	279.7	81.4	361.2	1.2593	1.5087	54
55	2623.7	2575.6	0.0011	0.0053	929.4	187.680	281.6	79.5	361.0	1.2647	1.5073	55
56	2682.1	2634.5	0.0011	0.0051	919.5	194.390	283.4	77.4	360.8	1.2701	1.5058	56
57	2741.6	2694.5	0.0011	0.0050	909.2	201.480	285.3	75.3	360.6	1.2756	1.5041	57
58	2802.1	2755.7	0.0011	0.0048	898.5	209.010	287.2	73.1	360.3	1.2812	1.5023	58
59	2863.7	2818.0	0.0011	0.0046	887.3	217.030	289.2	70.8	359.9	1.2869	1.5004	59
60	2926.3	2881.4	0.0011	0.0044	875.5	225.610	291.2	68.3	359.5	1.2928	1.4982	60
61	2990.1	2946.1	0.0012	0.0043	863.1	234.840	293.3	65.7	359.0	1.2988	1.4959	61
62	3054.9	3012.1	0.0012	0.0041	849.8	244.820	295.4	63.0	358.4	1.3049	1.4933	62
63	3121.0	3079.4	0.0012	0.0039	835.6	255.710	297.6	60.1	357.7	1.3112	1.4903	63
64	3188.2	3148.0	0.0012	0.0037	820.3	267.710	299.9	57.0	356.9	1.3178	1.4871	64
65	3256.6	3218.2	0.0012	0.0036	803.5	281.100	302.3	53.5	355.9	1.3247	1.4833	65
66	3326.3	3289.9	0.0013	0.0034	784.8	296.300	304.9	49.8	354.6	1.3321	1.4790	66
67	3397.2	3363.3	0.0013	0.0032	763.5	314.000	307.7	45.5	353.1	1.3400	1.4738	67
68	3469.4	3438.6	0.0014	0.0030	738.1	335.430	310.8	40.4	351.2	1.3488	1.4674	68
69	3542.8	3516.2	0.0014	0.0028	705.5	363.280	314.5	34.0	348.5	1.3593	1.4588	69
70	3616.8	3597.1	0.0015	0.0025	655.3	406.140	319.6	24.5	344.1	1.3740	1.4455	70

**Anexo 7. Tabla termodinámica vapor sobrecalentado refrigerante R-422A a 2800Kpa y 3000Kpa**

**Table 2 (continued)**  
**DuPont™ ISCEON® MO79 (R-422A) Superheated Vapour—Constant Pressure Tables**

V = Volume in m<sup>3</sup>/kg    H = Enthalpy in kJ/kg    S = Entropy in kJ/kg-K    (Saturation Properties in parentheses)

ABSOLUTE PRESSURE, kPa													
TEMP. °C	2400			2600			2800			3000			TEMP. °C
	(51.91°C)			(55.42°C)			(58.71°C)			(61.82°C)			
	V	H	S	V	H	S	V	H	S	V	H	S	
	(0.0059)	(361.4)	(1.5114)	(0.0053)	(361.0)	(1.5067)	(0.0047)	(360.0)	(1.5009)	(0.0041)	(358.5)	(1.4938)	
50	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	50
55	0.0063	366.5	1.5270	—	—	—	—	—	—	—	—	—	55
60	0.0067	373.9	1.5493	0.0058	369.1	1.5313	0.0048	362.9	1.5095	—	—	—	60
65	0.0071	380.6	1.5694	0.0062	376.7	1.5539	0.0054	372.0	1.5368	0.0046	366.2	1.5165	65
70	0.0075	387.0	1.5881	0.0066	383.6	1.5742	0.0058	379.8	1.5595	0.0050	375.3	1.5434	70
75	0.0078	393.1	1.6058	0.0069	390.1	1.5930	0.0061	386.8	1.5798	0.0054	383.1	1.5660	75
80	0.0081	399.0	1.6228	0.0072	396.3	1.6108	0.0065	393.4	1.5987	0.0058	390.2	1.5862	80
85	0.0084	404.9	1.6392	0.0075	402.4	1.6278	0.0067	399.8	1.6165	0.0061	396.9	1.6050	85
90	0.0087	410.6	1.6550	0.0078	408.3	1.6442	0.0070	405.9	1.6335	0.0063	403.4	1.6228	90
95	0.0090	416.2	1.6705	0.0081	414.1	1.6601	0.0073	411.9	1.6499	0.0066	409.6	1.6398	95
100	0.0092	421.9	1.6856	0.0083	419.9	1.6756	0.0075	417.8	1.6659	0.0069	415.6	1.6562	100
105	0.0095	427.4	1.7005	0.0086	425.6	1.6908	0.0078	423.6	1.6813	0.0071	421.6	1.6721	105
110	0.0097	433.0	1.7150	0.0088	431.2	1.7056	0.0080	429.4	1.6965	0.0073	427.5	1.6876	110
115	0.0099	438.5	1.7293	0.0090	436.8	1.7201	0.0082	435.1	1.7113	0.0075	433.3	1.7027	115
120	0.0102	444.0	1.7434	0.0092	442.4	1.7344	0.0084	440.8	1.7258	0.0077	439.1	1.7175	120
125	0.0104	449.5	1.7573	0.0095	448.0	1.7485	0.0086	446.4	1.7401	0.0079	444.8	1.7320	125
130	0.0106	455.0	1.7710	0.0097	453.5	1.7624	0.0088	452.1	1.7542	0.0081	450.6	1.7462	130
135	0.0108	460.5	1.7845	0.0099	459.1	1.7761	0.0090	457.7	1.7680	0.0083	456.2	1.7603	135
140	0.0111	465.9	1.7979	0.0101	464.6	1.7896	0.0092	463.3	1.7817	0.0085	461.9	1.7741	140
145	0.0113	471.4	1.8111	0.0103	470.2	1.8030	0.0094	468.9	1.7952	0.0087	467.6	1.7877	145
150	0.0115	477.0	1.8242	0.0105	475.7	1.8162	0.0096	474.5	1.8085	0.0089	473.3	1.8012	150
155	0.0117	482.5	1.8372	0.0107	481.3	1.8292	0.0098	480.1	1.8217	0.0091	478.9	1.8145	155
160	0.0119	488.0	1.8500	0.0109	486.9	1.8422	0.0100	485.7	1.8347	0.0092	484.6	1.8276	160
165	0.0121	493.5	1.8627	0.0111	492.4	1.8550	0.0102	491.3	1.8476	0.0094	490.2	1.8406	165
170	0.0123	499.1	1.8754	0.0112	498.0	1.8677	0.0104	497.0	1.8604	0.0096	495.9	1.8535	170
175	0.0125	504.7	1.8879	0.0114	503.6	1.8803	0.0105	502.6	1.8731	0.0097	501.6	1.8663	175
180	0.0127	510.2	1.9002	0.0116	509.3	1.8927	0.0107	508.3	1.8856	0.0099	507.3	1.8789	180
185	0.0129	515.8	1.9125	0.0118	514.9	1.9051	0.0109	513.9	1.8981	0.0101	513.0	1.8914	185
190	0.0131	521.5	1.9247	0.0120	520.5	1.9174	0.0110	519.6	1.9104	0.0102	518.7	1.9038	190
195	0.0132	527.1	1.9369	0.0121	526.2	1.9295	0.0112	525.3	1.9226	0.0104	524.4	1.9161	195
200	0.0134	532.8	1.9489	0.0123	531.9	1.9416	0.0114	531.0	1.9348	0.0106	530.1	1.9283	200

ABSOLUTE PRESSURE, kPa													
TEMP. °C	3200			3400									TEMP. °C
	(64.74°C)			(67.49°C)			()			()			
	V	H	S	V	H	S	V	H	S	V	H	S	
	(0.0036)	(356.1)	(1.4843)	(0.0031)	(352.2)	(1.4708)	()	()	()	()	()	()	
65	0.0037	357.1	1.4872	—	—	—	—	—	—	—	—	—	65
70	0.0043	369.9	1.5248	0.0036	362.3	1.5004	—	—	—	—	—	—	70
75	0.0048	378.9	1.5510	0.0042	373.9	1.5340	—	—	—	—	—	—	75
80	0.0051	386.7	1.5732	0.0046	382.8	1.5593	—	—	—	—	—	—	80
85	0.0055	393.9	1.5933	0.0049	390.6	1.5812	—	—	—	—	—	—	85
90	0.0057	400.6	1.6120	0.0052	397.7	1.6010	—	—	—	—	—	—	90
95	0.0060	407.1	1.6297	0.0055	404.5	1.6196	—	—	—	—	—	—	95
100	0.0063	413.4	1.6467	0.0057	411.0	1.6372	—	—	—	—	—	—	100
105	0.0065	419.5	1.6630	0.0060	417.4	1.6540	—	—	—	—	—	—	105
110	0.0067	425.6	1.6789	0.0062	423.6	1.6703	—	—	—	—	—	—	110
115	0.0069	431.5	1.6943	0.0064	429.6	1.6860	—	—	—	—	—	—	115
120	0.0071	437.4	1.7094	0.0066	435.6	1.7014	—	—	—	—	—	—	120
125	0.0073	443.2	1.7241	0.0068	441.6	1.7164	—	—	—	—	—	—	125
130	0.0075	449.0	1.7386	0.0070	447.5	1.7311	—	—	—	—	—	—	130
135	0.0077	454.8	1.7528	0.0071	453.3	1.7455	—	—	—	—	—	—	135
140	0.0079	460.5	1.7668	0.0073	459.1	1.7597	—	—	—	—	—	—	140
145	0.0081	466.3	1.7806	0.0075	464.9	1.7736	—	—	—	—	—	—	145
150	0.0082	472.0	1.7942	0.0077	470.7	1.7874	—	—	—	—	—	—	150
155	0.0084	477.7	1.8076	0.0078	476.5	1.8009	—	—	—	—	—	—	155
160	0.0086	483.4	1.8208	0.0080	482.2	1.8143	—	—	—	—	—	—	160
165	0.0087	489.1	1.8339	0.0082	488.0	1.8275	—	—	—	—	—	—	165
170	0.0089	494.8	1.8469	0.0083	493.7	1.8406	—	—	—	—	—	—	170
175	0.0091	500.5	1.8597	0.0085	499.5	1.8535	—	—	—	—	—	—	175
180	0.0092	506.3	1.8724	0.0086	505.3	1.8663	—	—	—	—	—	—	180
185	0.0094	512.0	1.8850	0.0088	511.0	1.8789	—	—	—	—	—	—	185
190	0.0095	517.7	1.8975	0.0089	516.8	1.8915	—	—	—	—	—	—	190
195	0.0097	523.5	1.9098	0.0091	522.6	1.9039	—	—	—	—	—	—	195
200	0.0098	529.3	1.9221	0.0092	528.4	1.9162	—	—	—	—	—	—	200
205	0.0100	535.0	1.9342	0.0093	534.2	1.9284	—	—	—	—	—	—	205
210	0.0101	540.8	1.9463	0.0095	540.0	1.9405	—	—	—	—	—	—	210
215	0.0103	546.7	1.9583	0.0096	545.8	1.9525	—	—	—	—	—	—	215



**Anexo 8. Tabla termodinámica propiedades saturadas refrigerante R-22 para 5°C**

**Table 1 (continued)**

**DuPont™ Freon® 22 Saturation Properties — Temperature Table**

Temp °C	Pressure [kPa]	Volume [m <sup>3</sup> /kg]		Density [kg/m <sup>3</sup> ]		Enthalpy [kJ/kg]			Entropy [kJ/K-kg]		Temp °C
		Liquid v <sub>f</sub>	Vapour v <sub>g</sub>	Liquid d <sub>f</sub>	Vapour d <sub>g</sub>	Liquid h <sub>f</sub>	Latent h <sub>fg</sub>	Vapour h <sub>g</sub>	Liquid s <sub>f</sub>	Vapour s <sub>g</sub>	
-46	78.9	0.0007	0.2684	1424.0	3.726	148.4	236.9	385.3	0.794	1.838	-46
-45	82.9	0.0007	0.2563	1421.0	3.901	149.4	236.4	385.8	0.799	1.835	-45
-44	87.1	0.0007	0.2450	1418.0	4.082	150.5	235.8	386.3	0.804	1.833	-44
-43	91.3	0.0007	0.2342	1416.0	4.270	151.6	235.1	386.7	0.809	1.830	-43
-42	95.8	0.0007	0.2240	1413.0	4.464	152.7	234.5	387.2	0.813	1.828	-42
-41	100.4	0.0007	0.2144	1410.0	4.665	153.8	233.9	387.7	0.818	1.825	-41
-40	105.2	0.0007	0.2052	1407.0	4.873	154.9	233.2	388.1	0.823	1.823	-40
-39	110.2	0.0007	0.1965	1404.0	5.088	156.0	232.6	388.6	0.827	1.821	-39
-38	115.4	0.0007	0.1883	1401.0	5.311	157.1	232.0	389.1	0.832	1.819	-38
-37	120.7	0.0007	0.1805	1398.0	5.541	158.2	231.3	389.5	0.837	1.816	-37
-36	126.3	0.0007	0.1730	1395.0	5.779	159.3	230.7	390.0	0.841	1.814	-36
-35	132.0	0.0007	0.1660	1392.0	6.025	160.4	230.0	390.4	0.846	1.812	-35
-34	138.0	0.0007	0.1593	1389.0	6.279	161.5	229.4	390.9	0.851	1.810	-34
-33	144.1	0.0007	0.1529	1386.0	6.541	162.6	228.7	391.3	0.855	1.808	-33
-32	150.5	0.0007	0.1468	1383.0	6.811	163.7	228.1	391.8	0.860	1.806	-32
-31	157.1	0.0007	0.1410	1380.0	7.090	164.8	227.4	392.2	0.864	1.804	-31
-30	163.9	0.0007	0.1355	1377.0	7.379	165.9	226.8	392.7	0.869	1.802	-30
-29	170.9	0.0007	0.1303	1374.0	7.676	167.0	226.1	393.1	0.873	1.800	-29
-28	178.2	0.0007	0.1253	1371.0	7.982	168.1	225.5	393.6	0.878	1.798	-28
-27	185.7	0.0007	0.1205	1368.0	8.298	169.2	224.8	394.0	0.882	1.796	-27
-26	193.4	0.0007	0.1160	1365.0	8.623	170.3	224.2	394.5	0.887	1.794	-26
-25	201.4	0.0007	0.1116	1362.0	8.958	171.4	223.5	394.9	0.891	1.792	-25
-24	209.7	0.0007	0.1075	1359.0	9.304	172.6	222.7	395.3	0.896	1.790	-24
-23	218.2	0.0007	0.1035	1356.0	9.659	173.7	222.1	395.8	0.900	1.788	-23
-22	227.0	0.0007	0.0998	1353.0	10.030	174.8	221.4	396.2	0.905	1.786	-22
-21	236.0	0.0007	0.0961	1350.0	10.400	175.9	220.7	396.6	0.909	1.784	-21
-20	245.3	0.0007	0.0927	1347.0	10.790	177.0	220.1	397.1	0.914	1.783	-20
-19	254.9	0.0007	0.0894	1343.0	11.190	178.2	219.3	397.5	0.918	1.781	-19
-18	264.8	0.0008	0.0862	1340.0	11.600	179.3	218.6	397.9	0.922	1.779	-18
-17	275.0	0.0008	0.0832	1337.0	12.020	180.4	217.9	398.3	0.927	1.777	-17
-16	285.4	0.0008	0.0803	1334.0	12.450	181.6	217.1	398.7	0.931	1.776	-16
-15	296.2	0.0008	0.0775	1331.0	12.900	182.7	216.5	399.2	0.935	1.774	-15
-14	307.3	0.0008	0.0749	1328.0	13.360	183.8	215.8	399.6	0.940	1.772	-14
-13	318.7	0.0008	0.0723	1324.0	13.830	185.0	215.0	400.0	0.944	1.771	-13
-12	330.4	0.0008	0.0699	1321.0	14.310	186.1	214.3	400.4	0.949	1.769	-12
-11	342.4	0.0008	0.0675	1318.0	14.810	187.3	213.5	400.8	0.953	1.767	-11
-10	354.8	0.0008	0.0653	1315.0	15.320	188.4	212.8	401.2	0.957	1.766	-10
-9	367.5	0.0008	0.0631	1311.0	15.850	189.6	212.0	401.6	0.962	1.764	-9
-8	380.5	0.0008	0.0610	1308.0	16.380	190.7	211.3	402.0	0.966	1.763	-8
-7	393.9	0.0008	0.0590	1305.0	16.940	191.9	210.5	402.4	0.970	1.761	-7
-6	407.7	0.0008	0.0571	1302.0	17.500	193.0	209.8	402.8	0.974	1.760	-6
-5	421.8	0.0008	0.0553	1298.0	18.090	194.2	209.0	403.2	0.979	1.758	-5
-4	436.3	0.0008	0.0535	1295.0	18.680	195.3	208.2	403.5	0.983	1.757	-4
-3	451.1	0.0008	0.0518	1292.0	19.300	196.5	207.4	403.9	0.987	1.755	-3
-2	466.4	0.0008	0.0502	1288.0	19.920	197.7	206.6	404.3	0.992	1.754	-2
-1	482.0	0.0008	0.0486	1285.0	20.570	198.8	205.9	404.7	0.996	1.752	-1
0	498.0	0.0008	0.0471	1282.0	21.230	200.0	205.0	405.0	1.000	1.751	0
1	514.4	0.0008	0.0457	1278.0	21.910	201.2	204.2	405.4	1.004	1.749	1
2	531.2	0.0008	0.0442	1275.0	22.600	202.4	203.4	405.8	1.008	1.748	2
3	548.4	0.0008	0.0429	1271.0	23.310	203.5	202.6	406.1	1.013	1.746	3
4	566.1	0.0008	0.0416	1268.0	24.040	204.7	201.8	406.5	1.017	1.745	4
5	584.1	0.0008	0.0403	1264.0	24.790	205.9	200.9	406.8	1.021	1.744	5
6	602.6	0.0008	0.0391	1261.0	25.560	207.1	200.1	407.2	1.025	1.742	6
7	621.5	0.0008	0.0380	1257.0	26.340	208.3	199.2	407.5	1.030	1.741	7



Anexo 9. Tabla termodinámica propiedades saturadas refrigerante R-22 para 93°C y 94°C

Table 1 (continued)  
DuPont™ Freon® 22 Saturation Properties — Temperature Table

Temp °C	Pressure [kPa]	Volume [m <sup>3</sup> /kg]		Density [kg/m <sup>3</sup> ]		Enthalpy [kJ/kg]			Entropy [kJ/K·kg]		Temp °C
		Liquid v <sub>f</sub>	Vapour v <sub>g</sub>	Liquid d <sub>f</sub>	Vapour d <sub>g</sub>	Liquid H <sub>f</sub>	Latent H <sub>fg</sub>	Vapour H <sub>g</sub>	Liquid S <sub>f</sub>	Vapour S <sub>g</sub>	
62	2534.0	0.0010	0.0085	1019.0	117.600	280.6	136.8	417.4	1.269	1.667	
63	2589.0	0.0010	0.0083	1013.0	120.800	282.1	135.2	417.3	1.263	1.666	
64	2645.0	0.0010	0.0081	1007.0	124.100	283.6	133.6	417.2	1.268	1.664	
65	2701.0	0.0010	0.0079	1001.0	127.400	285.2	131.9	417.1	1.272	1.662	
66	2759.0	0.0010	0.0076	995.3	130.900	286.7	130.2	416.9	1.277	1.660	
67	2817.0	0.0010	0.0074	989.1	134.500	288.3	128.4	416.7	1.281	1.659	
68	2876.0	0.0010	0.0072	982.8	138.200	289.9	126.6	416.5	1.285	1.657	
69	2936.0	0.0010	0.0070	976.3	142.000	291.5	124.8	416.3	1.290	1.655	
70	2997.0	0.0010	0.0069	969.7	146.000	293.1	123.0	416.1	1.295	1.653	
71	3059.0	0.0010	0.0067	963.0	150.100	294.7	121.1	415.8	1.299	1.651	
72	3123.0	0.0011	0.0065	956.1	154.400	296.4	119.1	415.5	1.304	1.649	
73	3187.0	0.0011	0.0063	949.0	158.800	298.0	117.2	415.2	1.308	1.647	
74	3252.0	0.0011	0.0061	941.8	163.400	299.7	115.2	414.9	1.313	1.645	
75	3318.0	0.0011	0.0060	934.4	168.200	301.5	113.0	414.5	1.318	1.642	
76	3385.0	0.0011	0.0058	926.7	173.100	303.2	110.9	414.1	1.323	1.640	
77	3453.0	0.0011	0.0056	918.9	178.300	305.0	108.6	413.6	1.327	1.638	
78	3522.0	0.0011	0.0054	910.8	183.800	306.8	106.3	413.1	1.332	1.635	
79	3592.0	0.0011	0.0053	902.4	189.400	308.6	104.0	412.6	1.337	1.633	
80	3664.0	0.0011	0.0051	893.7	195.400	310.4	101.6	412.0	1.342	1.630	
81	3736.0	0.0011	0.0050	884.8	201.700	312.3	99.1	411.4	1.347	1.627	
82	3810.0	0.0011	0.0048	875.4	208.300	314.3	96.4	410.7	1.353	1.624	
83	3885.0	0.0012	0.0047	865.7	215.300	316.3	93.6	409.9	1.358	1.621	
84	3961.0	0.0012	0.0045	855.5	222.700	318.3	90.8	409.1	1.363	1.618	
85	4038.0	0.0012	0.0043	844.8	230.600	320.4	87.8	408.2	1.369	1.614	
86	4116.0	0.0012	0.0042	833.5	239.000	322.5	84.7	407.2	1.375	1.610	
87	4196.0	0.0012	0.0040	821.6	248.100	324.8	81.3	406.1	1.381	1.606	
88	4277.0	0.0012	0.0039	808.8	257.900	327.1	77.7	404.8	1.387	1.602	
89	4359.0	0.0013	0.0037	795.1	268.700	329.5	73.9	403.4	1.393	1.597	
90	4442.0	0.0013	0.0036	780.1	280.600	332.1	69.8	401.9	1.400	1.592	
91	4527.0	0.0013	0.0034	763.6	294.000	334.8	65.3	400.1	1.407	1.586	
92	4614.0	0.0013	0.0032	745.1	309.300	337.8	60.1	397.9	1.415	1.580	
93	4702.0	0.0014	0.0031	723.7	327.500	341.0	54.3	395.3	1.424	1.572	
94	4791.0	0.0014	0.0029	697.8	350.200	344.8	47.2	392.0	1.434	1.562	
95	4882.0	0.0015	0.0026	662.9	382.000	349.6	37.7	387.3	1.446	1.549	

**Anexo 10. Tabla termodinámica vapor sobrecalentado refrigerante R-22 a 4700Kpa y 4800Kpa**

**Table 2** (continued)

**DuPont™ Freon® 22 Superheated Vapor — Constant Pressure Tables**

V = Volume in m<sup>3</sup>/kg

H = Enthalpy in kJ/kg

S = Entropy in kJ/kg·K

Saturation Properties in ( )

Absolute Pressure kPa													
Temp °C	4600			4700			4800			4900			Temp °C
	(91.84°C)			(92.98°C)			(94.1°C)			(95.19°C)			
	V	H	S	V	H	S	V	H	S	V	H	S	
	(0.0033)	(398.3)	(1.581)	(0.0031)	(395.4)	(1.572)	(0.0028)	(391.8)	(1.561)	(0.0026)	(388.1)	(1.545)	
95	0.0038	411.3	1.616	0.0035	406.4	1.602	0.0032	399.4	1.582	-	-	-	95
100	0.0043	423.0	1.648	0.0041	420.1	1.639	0.0039	416.9	1.629	0.0036	413.2	1.619	100
105	0.0047	431.9	1.672	0.0045	429.7	1.665	0.0043	427.4	1.657	0.0041	424.8	1.650	105
110	0.0051	439.6	1.692	0.0049	437.7	1.686	0.0047	435.8	1.679	0.0045	433.8	1.673	110
115	0.0053	446.5	1.710	0.0051	444.9	1.704	0.0050	443.2	1.699	0.0048	441.5	1.693	115
120	0.0056	452.9	1.726	0.0054	451.5	1.721	0.0052	450.0	1.716	0.0050	448.5	1.711	120
125	0.0058	459.0	1.742	0.0056	457.7	1.737	0.0055	456.4	1.732	0.0053	455.1	1.728	125
130	0.0061	464.8	1.756	0.0059	463.7	1.752	0.0057	462.5	1.747	0.0055	461.2	1.743	130
135	0.0063	470.5	1.770	0.0061	469.4	1.766	0.0059	468.3	1.762	0.0057	467.1	1.758	135
140	0.0066	476.0	1.783	0.0063	474.9	1.779	0.0061	473.9	1.775	0.0059	472.9	1.771	140
145	0.0067	481.3	1.796	0.0065	480.4	1.793	0.0063	479.4	1.789	0.0061	478.4	1.785	145
150	0.0069	486.6	1.809	0.0067	485.7	1.805	0.0065	484.8	1.801	0.0063	483.9	1.798	150
155	0.0071	491.8	1.821	0.0069	490.9	1.817	0.0067	490.0	1.814	0.0065	489.2	1.810	155
160	0.0072	496.9	1.833	0.0070	496.1	1.829	0.0069	495.2	1.826	0.0067	494.4	1.822	160
165	0.0074	501.9	1.844	0.0072	501.1	1.841	0.0070	500.4	1.838	0.0068	499.6	1.834	165
170	0.0076	506.9	1.856	0.0074	506.2	1.852	0.0072	505.4	1.849	0.0070	504.7	1.846	170
175	0.0077	511.9	1.867	0.0075	511.2	1.864	0.0074	510.5	1.860	0.0072	509.7	1.857	175
180	0.0079	516.8	1.878	0.0077	516.1	1.875	0.0075	515.4	1.871	0.0073	514.8	1.868	180
185	0.0081	521.7	1.889	0.0079	521.0	1.885	0.0077	520.4	1.882	0.0075	519.7	1.879	185
190	0.0082	526.6	1.899	0.0080	525.9	1.896	0.0078	525.3	1.893	0.0076	524.7	1.890	190
195	0.0084	531.4	1.910	0.0082	530.8	1.907	0.0080	530.2	1.904	0.0078	529.6	1.901	195
200	0.0085	536.3	1.920	0.0083	535.7	1.917	0.0081	535.1	1.914	0.0079	534.5	1.911	200
205	0.0087	541.1	1.930	0.0085	540.5	1.927	0.0083	539.9	1.924	0.0081	539.4	1.921	205
210	0.0088	545.9	1.940	0.0086	545.3	1.937	0.0084	544.8	1.934	0.0082	544.2	1.931	210
215	0.0090	550.7	1.950	0.0088	550.1	1.947	0.0086	549.6	1.944	0.0084	549.1	1.941	215
220	0.0091	555.5	1.960	0.0089	555.0	1.957	0.0087	554.4	1.954	0.0085	553.9	1.951	220

**Anexo 11. Tabla de propiedades saturadas para refrigerante R134a a 15°C**

**TABLE 1** (continued)  
**HFC-134a Saturation Properties—Temperature Table**

TEMP. °C	PRESSURE kPa (abs)	VOLUME m <sup>3</sup> /kg		DENSITY kg/m <sup>3</sup>		ENTHALPY kJ/kg			ENTROPY kJ/(kg)(K)		TEMP. °C
		LIQUID v <sub>f</sub>	VAPOR v <sub>g</sub>	LIQUID 1/v <sub>f</sub>	VAPOR 1/v <sub>g</sub>	LIQUID h <sub>f</sub>	LATENT h <sub>fg</sub>	VAPOR h <sub>g</sub>	LIQUID s <sub>f</sub>	VAPOR s <sub>g</sub>	
-40	51.14	0.0007	0.3614	1414.6	2.767	148.4	225.9	374.3	0.7967	1.7655	-40
-39	53.88	0.0007	0.3441	1411.8	2.906	149.6	225.3	374.9	0.8020	1.7641	-39
-38	56.74	0.0007	0.3279	1408.9	3.050	150.9	224.7	375.5	0.8073	1.7627	-38
-37	59.72	0.0007	0.3125	1406.0	3.200	152.1	224.0	376.2	0.8126	1.7613	-37
-36	62.83	0.0007	0.2980	1403.1	3.356	153.4	223.4	376.8	0.8178	1.7599	-36
-35	66.07	0.0007	0.2843	1400.2	3.518	154.6	222.8	377.4	0.8231	1.7586	-35
-34	69.43	0.0007	0.2713	1397.4	3.686	155.9	222.2	378.1	0.8283	1.7573	-34
-33	72.93	0.0007	0.2590	1394.5	3.861	157.1	221.5	378.7	0.8336	1.7561	-33
-32	76.58	0.0007	0.2474	1391.5	4.042	158.4	220.9	379.3	0.8388	1.7548	-32
-31	80.36	0.0007	0.2365	1388.6	4.229	159.7	220.3	379.9	0.8440	1.7536	-31
-30	84.29	0.0007	0.2260	1385.7	4.424	160.9	219.6	380.6	0.8492	1.7525	-30
-29	88.37	0.0007	0.2162	1382.8	4.625	162.2	219.0	381.2	0.8544	1.7513	-29
-28	92.61	0.0007	0.2069	1379.8	4.833	163.5	218.3	381.8	0.8595	1.7502	-28
-27	97.02	0.0007	0.1981	1376.9	5.049	164.7	217.7	382.4	0.8647	1.7491	-27
-26	101.58	0.0007	0.1896	1373.9	5.273	166.0	217.1	383.1	0.8698	1.7481	-26
-25	106.32	0.0007	0.1817	1371.0	5.504	167.3	216.4	383.7	0.8750	1.747	-25
-24	111.22	0.0007	0.1741	1368.0	5.743	168.6	215.7	384.3	0.8801	1.746	-24
-23	116.31	0.0007	0.1669	1365.0	5.991	169.8	215.1	384.9	0.8852	1.745	-23
-22	121.57	0.0007	0.1601	1362.0	6.247	171.1	214.4	385.5	0.8903	1.744	-22
-21	127.02	0.0007	0.1536	1359.0	6.511	172.4	213.7	386.2	0.8954	1.7431	-21
-20	132.67	0.0007	0.1474	1356.0	6.784	173.7	213.1	386.8	0.9005	1.7422	-20
-19	138.50	0.0007	0.1415	1353.0	7.066	175.0	212.4	387.4	0.9055	1.7413	-19
-18	144.54	0.0007	0.1359	1349.9	7.357	176.3	211.7	388.0	0.9106	1.7404	-18
-17	150.78	0.0007	0.1306	1346.9	7.658	177.6	211.0	388.6	0.9157	1.7395	-17
-16	157.23	0.0007	0.1255	1343.8	7.968	178.9	210.4	389.2	0.9207	1.7387	-16
-15	163.90	0.0007	0.1207	1340.8	8.288	180.2	209.7	389.8	0.9257	1.7379	-15
-14	170.78	0.0007	0.1160	1337.7	8.618	181.5	209.0	390.4	0.9307	1.7371	-14
-13	177.89	0.0007	0.1116	1334.6	8.958	182.8	208.3	391.1	0.9357	1.7363	-13
-12	185.22	0.0008	0.1074	1331.5	9.309	184.1	207.6	391.7	0.9407	1.7356	-12
-11	192.79	0.0008	0.1034	1328.4	9.671	185.4	206.9	392.3	0.9457	1.7348	-11
-10	200.60	0.0008	0.0996	1325.3	10.044	186.7	206.2	392.9	0.9507	1.7341	-10
-9	208.65	0.0008	0.0959	1322.1	10.428	188.0	205.4	393.5	0.9557	1.7334	-9
-8	216.95	0.0008	0.0924	1319.0	10.823	189.3	204.7	394.1	0.9606	1.7327	-8
-7	225.50	0.0008	0.0890	1315.8	11.231	190.7	204.0	394.7	0.9656	1.7321	-7
-6	234.32	0.0008	0.0858	1312.6	11.650	192.0	203.3	395.3	0.9705	1.7314	-6
-5	243.39	0.0008	0.0828	1309.4	12.082	193.3	202.5	395.9	0.9755	1.7308	-5
-4	252.74	0.0008	0.0798	1306.2	12.526	194.6	201.8	396.4	0.9804	1.7302	-4
-3	262.36	0.0008	0.0770	1303.0	12.983	196.0	201.1	397.0	0.9853	1.7295	-3
-2	272.26	0.0008	0.0743	1299.8	13.454	197.3	200.3	397.6	0.9902	1.729	-2
-1	282.45	0.0008	0.0718	1296.5	13.937	198.7	199.6	398.2	0.9951	1.7284	-1
0	292.93	0.0008	0.0693	1293.3	14.435	200.0	198.8	398.8	1.0000	1.7278	0
1	303.70	0.0008	0.0669	1290.0	14.946	201.3	198.0	399.4	1.0049	1.7273	1
2	314.77	0.0008	0.0646	1286.7	15.472	202.7	197.3	400.0	1.0098	1.7267	2
3	326.16	0.0008	0.0624	1283.4	16.013	204.0	196.5	400.5	1.0146	1.7262	3
4	337.85	0.0008	0.0604	1280.1	16.569	205.4	195.7	401.1	1.0195	1.7257	4
5	349.87	0.0008	0.0583	1276.7	17.140	206.8	194.9	401.7	1.0244	1.7252	5
6	362.21	0.0008	0.0564	1273.4	17.726	208.1	194.2	402.3	1.0292	1.7247	6
7	374.88	0.0008	0.0546	1270.0	18.329	209.5	193.4	402.8	1.0340	1.7242	7
8	387.88	0.0008	0.0528	1266.6	18.948	210.8	192.6	403.4	1.0389	1.7238	8
9	401.23	0.0008	0.0511	1263.2	19.583	212.2	191.8	404.0	1.0437	1.7233	9
10	414.92	0.0008	0.0494	1259.8	20.236	213.6	190.9	404.5	1.0485	1.7229	10
11	428.97	0.0008	0.0478	1256.3	20.906	215.0	190.1	405.1	1.0533	1.7224	11
12	443.37	0.0008	0.0463	1252.9	21.594	216.4	189.3	405.6	1.0582	1.722	12
13	458.11	0.0008	0.0448	1249.4	22.301	217.7	188.5	406.2	1.0630	1.7216	13
14	473.25	0.0008	0.0434	1245.9	23.026	219.1	187.6	406.8	1.0678	1.7212	14
15	488.78	0.0008	0.0421	1242.3	23.770	220.5	186.8	407.3	1.0726	1.7208	15
16	504.68	0.0008	0.0408	1238.8	24.533	221.9	185.9	407.8	1.0773	1.7204	16
17	520.98	0.0008	0.0395	1235.2	25.317	223.3	185.1	408.4	1.0821	1.72	17
18	537.67	0.0008	0.0383	1231.6	26.121	224.7	184.2	408.9	1.0869	1.7196	18
19	554.76	0.0008	0.0371	1228.0	26.945	226.1	183.3	409.5	1.0917	1.7192	19



**Anexo 12. Tabla propiedades saturadas para refrigerante R134a a 90°C y 91°C**

**TABLE 1** (continued)  
**HFC-134a Saturation Properties—Temperature Table**

TEMP. °C	PRESSURE kPa (abs)	VOLUME m <sup>3</sup> /kg		DENSITY kg/m <sup>3</sup>		ENTHALPY kJ/kg			ENTROPY kJ/(kg)(K)		TEMP. °C
		LIQUID v <sub>f</sub>	VAPOR v <sub>g</sub>	LIQUID 1/v <sub>f</sub>	VAPOR 1/v <sub>g</sub>	LIQUID h <sub>f</sub>	LATENT h <sub>fg</sub>	VAPOR h <sub>g</sub>	LIQUID s <sub>f</sub>	VAPOR s <sub>g</sub>	
80	2632.97	0.0011	0.0065	927.8	155.010	322.9	106.3	429.2	1.3854	1.6863	80
81	2689.46	0.0011	0.0063	920.1	159.904	324.9	104.2	429.1	1.3906	1.6849	81
82	2746.90	0.0011	0.0061	912.1	165.022	326.8	102.1	428.9	1.3959	1.6834	82
83	2805.31	0.0011	0.0059	903.9	170.383	328.8	99.9	428.7	1.4012	1.6818	83
84	2864.70	0.0011	0.0057	895.5	176.010	330.7	97.7	428.4	1.4066	1.68	84
85	2925.11	0.0011	0.0055	886.7	181.929	332.8	95.3	428.1	1.4121	1.6782	85
86	2986.54	0.0011	0.0053	877.6	188.169	334.8	92.9	427.7	1.4176	1.6762	86
87	3049.01	0.0012	0.0051	868.2	194.766	336.9	90.4	427.3	1.4232	1.6741	87
88	3112.55	0.0012	0.0050	858.4	201.761	339.0	87.7	426.8	1.4289	1.6719	88
89	3177.10	0.0012	0.0048	848.1	209.206	341.2	85.0	426.2	1.4347	1.6694	89
90	3242.87	0.0012	0.0046	837.3	217.162	343.4	82.1	425.5	1.4406	1.6668	90
91	3309.78	0.0012	0.0044	826.0	225.706	345.7	79.1	424.8	1.4466	1.6639	91
92	3377.85	0.0012	0.0043	814.0	234.936	348.0	75.9	423.9	1.4528	1.6607	92
93	3447.13	0.0012	0.0041	801.1	244.978	350.4	72.5	422.9	1.4592	1.6572	93
94	3517.65	0.0013	0.0039	787.4	256.005	353.0	68.9	421.8	1.4658	1.6533	94
95	3589.44	0.0013	0.0037	772.3	268.255	355.6	64.9	420.5	1.4727	1.6489	95
96	3662.57	0.0013	0.0035	755.8	282.079	358.4	60.5	418.9	1.4799	1.6439	96
97	3737.09	0.0014	0.0034	737.1	298.029	361.3	55.7	417.0	1.4877	1.6381	97
98	3813.08	0.0014	0.0032	715.4	317.065	364.6	50.0	414.6	1.4963	1.6311	98
99	3890.64	0.0015	0.0029	688.6	341.133	368.4	43.2	411.5	1.5061	1.6221	99
100	3969.94	0.0015	0.0027	651.4	375.503	373.2	33.8	407.0	1.5187	1.6092	100
101	4051.35	0.0018	0.0022	566.4	457.594	383.0	13.0	396.0	1.5447	1.5794	101

**Anexo 13. Tablas de propiedades de vapor sobrecalentado refrigerante R-143a a 3200Kpa**

**TABLE 2 (continued)**

**HFC-134a Superheated Vapor—Constant Pressure Tables**

V = Volume in m<sup>3</sup>/kg    H = Enthalpy in kJ/kg    S = Entropy in kJ/(kg)(K)    v<sub>s</sub> = Velocity of Sound in m/sec  
Cp = Heat Capacity at Constant Pressure in kJ/(kg)(°C)    Cp/Cv = Heat Capacity Ratio (Dimensionless)

TEMP °C	PRESSURE = 2800.00 kPa (abs)							PRESSURE = 2800.00 kPa (abs)						TEMP °C
	V	H	S	Cp	Cp/Cv	v <sub>s</sub>		V	H	S	Cp	Cp/Cv	v <sub>s</sub>	
79.41	0.00107	321.8	1.3823	2.0468	2.0008	236.5	SAT LIQ	0.00111	328.6	1.4007	2.1903	2.1171	216.0	82.91
79.41	0.00657	429.3	1.6872	1.9511	1.9009	118.2	SAT VAP	0.00689	428.7	1.6819	2.1936	2.0991	115.2	82.91
80	0.00664	430.4	1.6904	1.9044	1.8601	119.2		—	—	—	—	—	—	80
85	0.00718	439.2	1.7151	1.6459	1.6339	126.1		0.00614	433.0	1.6941	1.9759	1.9096	118.8	85
90	0.00763	447.1	1.7369	1.5063	1.5114	131.7		0.00666	442.1	1.7193	1.6913	1.6622	125.8	90
95	0.00803	454.4	1.7569	1.4179	1.4330	136.5		0.00709	450.2	1.7413	1.5403	1.5307	131.5	95
100	0.00839	461.3	1.7756	1.3571	1.3781	140.7		0.00747	457.6	1.7614	1.4459	1.4477	136.4	100
105	0.00873	468.0	1.7933	1.3131	1.3373	144.5		0.00782	464.7	1.7802	1.3812	1.3897	140.7	105
110	0.00905	474.5	1.8103	1.2801	1.3056	148.0		0.00814	471.4	1.7980	1.3345	1.3469	144.5	110
115	0.00935	480.8	1.8268	1.2549	1.2803	151.2		0.00844	478.0	1.8150	1.2966	1.3137	148.1	115
120	0.00964	487.0	1.8427	1.2354	1.2595	154.2		0.00872	484.5	1.8315	1.2729	1.2873	151.3	120
125	0.00992	493.2	1.8582	1.2201	1.2422	157.1		0.00899	490.8	1.8474	1.2521	1.2657	154.4	125
130	0.01018	499.2	1.8734	1.2081	1.2275	159.8		0.00925	497.0	1.8630	1.2359	1.2477	157.3	130
135	0.01044	505.2	1.8882	1.1988	1.2149	162.3		0.00951	503.1	1.8781	1.2231	1.2324	160.0	135
140	0.01069	511.2	1.9027	1.1916	1.2039	164.8		0.00975	509.2	1.8929	1.2131	1.2193	162.6	140
145	0.01094	517.2	1.9170	1.1861	1.1943	167.1		0.00999	515.3	1.9075	1.2053	1.2080	165.1	145
150	0.01118	523.1	1.9311	1.1821	1.1858	169.4		0.01022	521.3	1.9218	1.1994	1.1981	167.4	150
155	0.01142	529.0	1.9450	1.1793	1.1782	171.5		0.01045	527.3	1.9358	1.1949	1.1893	169.7	155
160	0.01165	534.9	1.9587	1.1775	1.1714	173.6		0.01067	533.2	1.9497	1.1917	1.1814	171.9	160
165	0.01187	540.8	1.9722	1.1765	1.1653	175.7		0.01088	539.2	1.9634	1.1895	1.1744	174.0	165
170	0.01210	546.6	1.9855	1.1763	1.1597	177.6		0.01110	545.1	1.9769	1.1882	1.1681	176.1	170
175	0.01232	552.5	1.9987	1.1767	1.1547	179.6		0.01131	551.1	1.9902	1.1877	1.1624	178.1	175
180	0.01253	558.4	2.0118	1.1776	1.1500	181.4		0.01151	557.0	2.0034	1.1878	1.1572	180.0	180
185	0.01275	564.3	2.0247	1.1790	1.1458	183.2		0.01172	562.9	2.0164	1.1885	1.1524	181.9	185
190	0.01296	570.2	2.0375	1.1808	1.1418	185.0		0.01192	568.9	2.0293	1.1897	1.1480	183.7	190
195	0.01317	576.1	2.0502	1.1830	1.1382	186.7		0.01212	574.8	2.0421	1.1913	1.1440	185.5	195
200	0.01338	582.0	2.0628	1.1855	1.1348	188.4		0.01232	580.8	2.0547	1.1932	1.1402	187.3	200
205	0.01358	588.0	2.0753	1.1883	1.1317	190.1		0.01251	586.8	2.0673	1.1955	1.1367	189.0	205
210	0.01379	593.9	2.0876	1.1912	1.1288	191.7		0.01270	592.8	2.0798	1.1981	1.1335	190.6	210
215	0.01399	599.9	2.0999	1.1944	1.1260	193.3		0.01289	598.8	2.0921	1.2009	1.1305	192.3	215
220	0.01419	605.9	2.1121	1.1978	1.1234	194.9		0.01308	604.8	2.1044	1.2039	1.1277	193.9	220
225	0.01439	611.9	2.1242	1.2014	1.1210	196.4		0.01327	610.8	2.1165	1.2071	1.1250	195.5	225
230	0.01458	617.9	2.1362	1.2050	1.1187	197.9		0.01346	616.8	2.1286	1.2105	1.1225	197.0	230
235	—	—	—	—	—	—		0.01364	622.9	2.1406	1.2140	1.1202	198.6	235

TEMP °C	PRESSURE = 3000.00 kPa (abs)							PRESSURE = 3200.00 kPa (abs)						TEMP °C
	V	H	S	Cp	Cp/Cv	v <sub>s</sub>		V	H	S	Cp	Cp/Cv	v <sub>s</sub>	
86.22	0.00114	335.3	1.4188	2.3843	2.2770	195.8	SAT LIQ	0.00118	342.0	1.4367	2.6657	2.5126	175.9	89.35
86.22	0.00628	427.6	1.6758	2.5300	2.3769	112.1	SAT VAP	0.00472	426.0	1.6685	3.0280	2.7912	109.1	89.35
90	0.00675	436.1	1.6992	2.0156	1.9317	119.1		0.00482	427.9	1.6737	2.8017	2.5961	110.6	90
95	0.00624	445.3	1.7245	1.7214	1.6778	126.1		0.00544	439.5	1.7056	2.0237	1.9273	119.9	95
100	0.00665	453.5	1.7466	1.5654	1.5427	131.7		0.00589	448.8	1.7307	1.7365	1.6809	126.7	100
105	0.00701	461.1	1.7667	1.4676	1.4573	136.6		0.00628	457.1	1.7527	1.5813	1.5473	132.3	105
110	0.00733	468.2	1.7855	1.4007	1.3977	140.9		0.00662	464.7	1.7728	1.4831	1.4619	137.2	110
115	0.00764	475.1	1.8034	1.3523	1.3537	144.8		0.00692	472.0	1.7916	1.4156	1.4022	141.4	115
120	0.00792	481.8	1.8204	1.3161	1.3197	148.4		0.00721	478.9	1.8094	1.3667	1.3579	145.3	120
125	0.00819	488.3	1.8369	1.2884	1.2926	151.7		0.00748	485.7	1.8264	1.3299	1.3236	148.9	125
130	0.00845	494.7	1.8528	1.2699	1.2704	154.7		0.00773	492.2	1.8428	1.3017	1.2962	152.2	130
135	0.00869	501.0	1.8683	1.2500	1.2520	157.6		0.00798	498.7	1.8587	1.2797	1.2738	155.3	135
140	0.00893	507.2	1.8835	1.2366	1.2363	160.4		0.00821	505.1	1.8742	1.2624	1.2551	158.2	140
145	0.00916	513.3	1.8983	1.2262	1.2229	163.0		0.00844	511.3	1.8893	1.2487	1.2393	160.9	145
150	0.00939	519.4	1.9128	1.2179	1.2113	165.5		0.00865	517.5	1.9041	1.2379	1.2257	163.5	150
155	0.00960	525.5	1.9271	1.2116	1.2011	167.9		0.00887	523.7	1.9186	1.2294	1.2139	166.0	155
160	0.00982	531.6	1.9411	1.2068	1.1921	170.2		0.00907	529.8	1.9328	1.2228	1.2036	168.4	160
165	0.01003	537.6	1.9549	1.2032	1.1841	172.4		0.00927	535.9	1.9468	1.2177	1.1944	170.7	165
170	0.01023	543.6	1.9686	1.2007	1.1770	174.5		0.00947	542.0	1.9606	1.2140	1.1863	173.0	170
175	0.01043	549.6	1.9820	1.1992	1.1705	176.6		0.00967	548.1	1.9742	1.2113	1.1790	175.1	175
180	0.01063	555.6	1.9953	1.1984	1.1646	178.6		0.00986	554.1	1.9876	1.2085	1.1724	177.2	180
185	0.01083	561.6	2.0085	1.1983	1.1593	180.5		0.01004	560.2	2.0009	1.2086	1.1665	179.2	185
190	0.01102	567.6	2.0215	1.1988	1.1544	182.4		0.01023	566.2	2.0140	1.2083	1.1611	181.2	190
195	0.01121	573.6	2.0344	1.1998	1.1499	184.3		0.01041	572.3	2.0270	1.2086	1.1561	183.1	195
200	0.01139	579.6	2.0471	1.2012	1.1458	186.1		0.01059	578.3	2.0398	1.2094	1.1515	184.9	200
205	0.01158	585.6	2.0598	1.2030	1.1420	187.8		0.01077	584.4	2.0526	1.2107	1.1473	186.7	205
210	0.01176	591.6	2.0723	1.2051	1.1384	189.6		0.01094	590.4	2.0652	1.2123	1.1434	188.5	210
215	0.01194	597.6	2.0847	1.2075	1.1351	191.3		0.01111	596.5	2.0776	1.2143	1.1398	190.2	215
220	0.01212	603.7	2.0970	1.2102	1.1320	192.9		0.01129	602.6	2.0900	1.2166	1.1365	191.9	220
225	0.01230	609.7	2.1092	1.2130	1.1291	194.5		0.01146	608.6	2.1023	1.2191	1.1333	193.6	225
230	0.01248	615.8	2.1214	1.2161	1.1264	196.1		0.01162	614.8	2.1145	1.2218	1.1304	195.2	230
235	0.01265	621.9	2.1334	1.2194	1.1239	197.7		0.01179	620.9	2.1266	1.2248	1.1276	196.8	235
240	0.01283	628.0	2.1454	1.2227	1.1215	199.2		0.01196	627.0	2.1386	1.2279	1.1251	198.4	240

**Anexo 14. Tablas termodinámicas para vapor sobrecalentado refrigerante R-134a a 3400Kpa**

**TABLE 2 (continued)**  
**HFC-134a Superheated Vapor—Constant Pressure Tables**

V = Volume in m<sup>3</sup>/kg    H = Enthalpy in kJ/kg    S = Entropy in kJ/(kg)(K)    v<sub>s</sub> = Velocity of Sound in m/sec  
 Cp = Heat Capacity at Constant Pressure in kJ/(kg)(°C)    Cp/Cv = Heat Capacity Ratio (Dimensionless)

TEMP °C	PRESSURE = 3400.00 kPa (abs)							PRESSURE = 3600.00 kPa (abs)						TEMP °C
	V	H	S	Cp	Cp/Cv	v <sub>s</sub>		V	H	S	Cp	Cp/Cv	v <sub>s</sub>	
92.32	0.00123	348.8	1.4548	3.1183	2.8961	156.1	SAT LIQ SAT VAP	0.00130	356.0	1.4737	3.9821	3.6345	136.2	95.15
92.32	0.00420	423.6	1.6596	3.8377	3.4671	106.0		0.00370	420.3	1.6483	5.3756	4.7521	102.8	95.15
95	0.00463	432.0	1.6825	2.6656	2.4643	112.6		—	—	—	—	—	—	95
100	0.00518	443.4	1.7132	2.0061	1.9016	121.2		0.00449	436.6	1.6924	2.5079	2.3168	115.0	100
105	0.00561	452.7	1.7379	1.7383	1.6732	127.8		0.00498	447.6	1.7216	1.9711	1.8620	122.9	105
110	0.00597	461.0	1.7597	1.5889	1.5452	133.3		0.00537	456.8	1.7458	1.7296	1.6572	129.2	110
115	0.00629	468.7	1.7796	1.4930	1.4622	138.0		0.00571	465.1	1.7672	1.5896	1.5377	134.5	115
120	0.00658	475.9	1.7983	1.4263	1.4035	142.2		0.00601	472.8	1.7870	1.4978	1.4586	139.1	120
125	0.00685	482.9	1.8160	1.3777	1.3596	146.1		0.00628	480.1	1.8055	1.4333	1.4019	143.2	125
130	0.00710	489.7	1.8329	1.3411	1.3255	149.6		0.00654	487.1	1.8230	1.3859	1.3592	147.0	130
135	0.00734	496.4	1.8493	1.3128	1.2982	152.9		0.00678	494.0	1.8399	1.3499	1.3258	150.5	135
140	0.00757	502.9	1.8651	1.2908	1.2758	156.0		0.00700	500.6	1.8561	1.3220	1.2989	153.8	140
145	0.00779	509.3	1.8805	1.2733	1.2571	158.9		0.00722	507.2	1.8719	1.3001	1.2767	156.8	145
150	0.00801	515.6	1.8956	1.2595	1.2413	161.6		0.00743	513.6	1.8873	1.2828	1.2582	159.7	150
155	0.00821	521.9	1.9103	1.2485	1.2276	164.2		0.00763	520.0	1.9022	1.2690	1.2424	162.4	155
160	0.00842	528.1	1.9247	1.2399	1.2158	166.7		0.00783	526.3	1.9169	1.2581	1.2288	165.0	160
165	0.00861	534.3	1.9389	1.2331	1.2054	169.1		0.00802	532.6	1.9313	1.2494	1.2170	167.5	165
170	0.00880	540.4	1.9529	1.2279	1.1962	171.4		0.00821	538.8	1.9454	1.2425	1.2066	169.9	170
175	0.00899	546.6	1.9667	1.2240	1.1880	173.6		0.00839	545.0	1.9594	1.2373	1.1974	172.2	175
180	0.00917	552.7	1.9802	1.2211	1.1806	175.8		0.00857	551.2	1.9731	1.2333	1.1892	174.4	180
185	0.00935	558.8	1.9936	1.2192	1.1740	177.9		0.00874	557.4	1.9866	1.2303	1.1818	176.6	185
190	0.00953	564.9	2.0068	1.2181	1.1680	179.9		0.00891	563.5	1.9999	1.2284	1.1752	178.7	190
195	0.00971	571.0	2.0199	1.2177	1.1625	181.9		0.00908	569.7	2.0131	1.2272	1.1691	180.7	195
200	0.00988	577.1	2.0328	1.2179	1.1575	183.8		0.00925	575.8	2.0261	1.2267	1.1636	182.7	200
205	0.01005	583.1	2.0457	1.2186	1.1529	185.7		0.00941	581.9	2.0390	1.2267	1.1586	184.6	205
210	0.01022	589.2	2.0583	1.2197	1.1486	187.5		0.00957	588.1	2.0518	1.2273	1.1540	186.5	210
215	0.01038	595.3	2.0709	1.2212	1.1447	189.3		0.00973	594.2	2.0644	1.2284	1.1497	188.3	215
220	0.01055	601.5	2.0834	1.2231	1.1410	191.0		0.00989	600.3	2.0770	1.2298	1.1457	190.1	220
225	0.01071	607.6	2.0957	1.2253	1.1376	192.7		0.01005	606.5	2.0894	1.2316	1.1420	191.8	225
230	0.01087	613.7	2.1080	1.2277	1.1345	194.4		0.01020	612.7	2.1017	1.2336	1.1386	193.5	230
235	0.01103	619.8	2.1201	1.2303	1.1315	196.0		0.01035	618.8	2.1139	1.2359	1.1354	195.2	235
240	0.01119	626.0	2.1322	1.2331	1.1287	197.6		0.01050	625.0	2.1260	1.2385	1.1324	196.8	240
245	0.01134	632.2	2.1441	1.2361	1.1261	199.2		0.01065	631.4	2.1380	1.2412	1.1296	198.4	245
250	—	—	—	—	—	—		0.01080	637.4	2.1500	1.2441	1.1269	200.0	250

TEMP °C	PRESSURE = 3800.00 kPa (abs)							PRESSURE = 4000.00 kPa (abs)						TEMP °C
	V	H	S	Cp	Cp/Cv	v <sub>s</sub>		V	H	S	Cp	Cp/Cv	v <sub>s</sub>	
97.83	0.00139	364.0	1.4947	6.3049	5.6279	116.1	SAT LIQ SAT VAP	0.00158	375.6	1.5250	28.1470	24.2211	95.7	100.37
97.83	0.00319	415.1	1.6324	9.3686	8.0817	99.5		0.00254	404.4	1.6022	42.1018	35.2394	95.0	100.37
100	0.00374	427.0	1.6645	3.8743	3.4563	107.3		—	—	—	—	—	—	100
105	0.00438	441.5	1.7031	2.3563	2.1772	117.6		0.00376	433.7	1.6804	3.1309	2.8151	111.6	105
110	0.00482	452.1	1.7309	1.9265	1.8153	124.9		0.00429	446.7	1.7143	2.2216	2.0540	120.4	110
115	0.00517	461.1	1.7543	1.7135	1.6356	130.8		0.00468	456.8	1.7406	1.8780	1.7663	127.1	115
120	0.00549	469.4	1.7754	1.5848	1.5261	135.9		0.00501	465.7	1.7634	1.6927	1.6106	132.7	120
125	0.00577	477.1	1.7948	1.4996	1.4519	140.4		0.00530	473.8	1.7840	1.5762	1.5117	137.5	125
130	0.00602	484.4	1.8131	1.4371	1.3979	144.4		0.00556	481.5	1.8031	1.4963	1.4429	141.8	130
135	0.00626	491.4	1.8306	1.3915	1.3569	148.1		0.00580	488.8	1.8212	1.4384	1.3921	145.8	135
140	0.00649	498.3	1.8473	1.3566	1.3245	151.6		0.00603	495.9	1.8385	1.3950	1.3530	149.4	140
145	0.00671	505.0	1.8634	1.3295	1.2982	154.8		0.00624	502.8	1.8550	1.3615	1.3219	152.8	145
150	0.00691	511.6	1.8791	1.3080	1.2766	157.8		0.00645	509.5	1.8710	1.3354	1.2965	155.9	150
155	0.00711	518.1	1.8944	1.2910	1.2583	160.7		0.00664	516.2	1.8866	1.3146	1.2755	158.9	155
160	0.00731	524.5	1.9093	1.2775	1.2428	163.4		0.00683	522.7	1.9018	1.2981	1.2577	161.7	160
165	0.00749	530.9	1.9239	1.2666	1.2293	166.0		0.00702	529.2	1.9166	1.2849	1.2424	164.4	165
170	0.00767	537.2	1.9382	1.2580	1.2176	168.4		0.00719	535.6	1.9311	1.2743	1.2293	167.0	170
175	0.00785	543.5	1.9523	1.2512	1.2073	170.8		0.00737	541.9	1.9454	1.2658	1.2177	169.4	175
180	0.00802	549.7	1.9661	1.2459	1.1982	173.1		0.00753	548.2	1.9594	1.2591	1.2076	171.8	180
185	0.00819	555.9	1.9798	1.2419	1.1900	175.3		0.00770	554.5	1.9732	1.2539	1.1985	174.1	185
190	0.00836	562.1	1.9932	1.2390	1.1827	177.5		0.00786	560.8	1.9867	1.2499	1.1904	176.3	190
195	0.00852	568.3	2.0065	1.2369	1.1760	179.6		0.00802	567.0	2.0001	1.2470	1.1831	178.4	195
200	0.00868	574.5	2.0197	1.2357	1.1700	181.6		0.00817	573.2	2.0134	1.2450	1.1765	180.5	200
205	0.00884	580.7	2.0326	1.2351	1.1645	183.5		0.00833	579.4	2.0265	1.2438	1.1705	182.5	205
210	0.00900	586.9	2.0455	1.2351	1.1594	185.5		0.00848	585.7	2.0394	1.2432	1.1650	184.5	210
215	0.00915	593.0	2.0582	1.2357	1.1548	187.3		0.00863	591.9	2.0522	1.2431	1.1600	186.4	215
220	0.00930	599.2	2.0708	1.2366	1.1505	189.1		0.00877	598.1	2.0649	1.2436	1.1554	188.3	220
225	0.00945	605.4	2.0833	1.2380	1.1465	190.9		0.00892	604.3	2.0774	1.2445	1.1511	190.1	225
230	0.00960	611.6	2.0957	1.2397	1.1428	192.7		0.00906	610.5	2.0898	1.2458	1.1471	191.9	230
235	0.00975	617.8	2.1079	1.2416	1.1394	194.4		0.00920	616.8	2.1022	1.2475	1.1434	193.6	235
240	0.00989	624.0	2.1201	1.2439	1.1362	196.1		0.00934	623.0	2.1144	1.2494	1.1400	195.3	240
245	0.01004	630.2	2.1322	1.2463	1.1331	197.7		0.00948	629.3	2.1265	1.2515	1.1368	197.0	245
250	0.01018	636.5	2.1441	1.2490	1.1303	199.3		0.00962	635.5	2.1386	1.2539	1.1337	198.6	250



## Anexo 15. Cálculos termodinámicos para refrigerante R-143a

Refrigerante R-134a	Estado 1 (Vapor Saturado)	Estado 2 (Vapor Subenfriado)	Estado 3 (Líquido Saturado)	Estado 4 (Mezcla)
Temperatura [°C]	15	99,40846176	90,53478261	15
Presión [kPa]	488,78	3278,652304	3278,652304	488,78
Entalpía $\left[\frac{kJ}{kg}\right]$	407,3	445,58	344,63	344,63
Entropía $\left[\frac{kJ}{kg \cdot K}\right]$	1,7208	1,7208	1,44380896	1,50333758
CALIDAD MEZCLA				0,6645027495

$W_C = h_2 - h_1$	$Q_1 = h_2 - h_3$	$Q_2 = h_1 - h_4$	$C_R = \frac{Q_2}{(W_{NET})}$	$\dot{m}_{Ref} = \frac{\dot{Q}_{H2O}}{Q_2}$	Toneladas de refrigeración consumidas por el sistema	Valor de Tonelada de Refrigeración	Valor de Chiller
38,2761 $\left[\frac{kJ}{kg}\right]$	100,95 $\left[\frac{kJ}{kg}\right]$	62,67 $\left[\frac{kJ}{kg}\right]$	1,6373	1792,278 $\frac{kg}{h}$	9	5	1.700.000 <u>5 20.021.941</u>

POTENCIA COMPRESOR				
$\frac{BTU}{h}$	$\frac{kJ}{h}$	$\frac{kcal}{h}$	$HP$	$HP$
60021,62977	68621,6397	16385,17716	19,05596304	25,55446489

Datos Entrada	Temperatura entrada [°C]	Temperatura Salida [°C]	Calor Especifico H2O [30°C]	Caudal H2O [30°C]	Calor Entrada al Evaporador	Caudal H2O [30°C]	Densidad H2O [30°C]	Flujo masico H2O [30°C]	Calor Entrada al Evaporador
Agua Taconizada	30	15	4,178 $\left[\frac{kJ}{kg \cdot K}\right]$	30 Lpm	62,67 $\left[\frac{kJ}{kg}\right]$	1,8 $\frac{m^3}{h}$	999,71 $\frac{kg}{m^3}$	1792,278 $\frac{kg}{h}$	112332,06236 $\left[\frac{kJ}{h}\right]$

INTERPOLACIÓN ESTADO 3 (Según Tablas DuPont)			
Temperatura [°C]	90	90,53478261	91
Presión [kPa]	3242,87	3278,652304	3309,78
Entalpía $\left[\frac{kJ}{kg}\right]$	343,4	344,63	345,7
Entropía $\left[\frac{kJ}{kg \cdot K}\right]$	1,4406	1,4438087	1,4466

INTERPOLACIÓN ESTADO 2 PRESIÓN INFERIOR = 3200kPa (Según Tablas Dupont)			
Temperatura [°C]	95	98,02788845	100
Entalpía $\left[\frac{kJ}{kg}\right]$	439,5	445,13	448,8
Entropía $\left[\frac{kJ}{kg \cdot K}\right]$	1,7056	1,7208	1,7307

INTERPOLACIÓN ESTADO 2 PRESIÓN SUPERIOR = 3400kPa (Según Tablas Dupont)			
Temperatura [°C]	100	101,5384615	105
Entalpía $\left[\frac{kJ}{kg}\right]$	443,4	446,26	452,7
Entropía $\left[\frac{kJ}{kg \cdot K}\right]$	1,7132	1,7208	1,7379

INTERPOLACIÓN ESTADO 2 ENTROPIA = 1,7208 (Definitiva)			
Temperatura [°C]	98,02788845	99,40846176	101,5384615
Presión [kPa]	3200	3278,652304	3400
Entalpía $\left[\frac{kJ}{kg}\right]$	445,13	445,58	446,26

Datos Tablas DuPont R-134a	TEMPERATURA	P	v	h <sub>g</sub>	h <sub>f</sub>	v <sub>f</sub>	v <sub>fg</sub>	h <sub>fg</sub>
	15	488,78	220,5	186,8	407,3	1,0726	0,6482	1,7208

## Anexo 16. Cálculos termodinámicos para refrigerante R-407C

Refrigerante R-407C	Estado 1 (Vapor Saturado)	Estado 2 (Vapor Subenfriado)	Estado 3 (Líquido Saturado)	Estado 4 (Mezcla)
Temperatura [°C]	10	97,13021794	73,94285714	10
Presión [kPa]	632,8	3637,311429	3637,311429	632,8
Entalpía $\left[\frac{kJ}{kg}\right]$	419,3	461,81	335,74	335,74
Entropía $\left[\frac{kJ}{kg \cdot K}\right]$	1,7831	1,7831	1,42416	1,404595582
CALIDAD MEZCLA				0,591593951

$W_C = h_2 - h_1$	$Q_1 = h_2 - h_3$	$Q_2 = h_1 - h_4$	$C_R = \frac{Q_2}{(W_{NET})}$	$\dot{m}_{Ref} = \frac{\dot{Q}_{H2O}}{Q_2}$	Toneladas de refrigeración consumidas por el sistema	Valor de Tonelada de Refrigeración	Valor de Chiller
42,5121 $\left[\frac{kJ}{kg}\right]$	126,07 $\left[\frac{kJ}{kg}\right]$	83,56 $\left[\frac{kJ}{kg}\right]$	1,9656	1792,278 $\frac{kg}{h}$	12	5	1.700.000 <u>5 20.029.291</u>

POTENCIA COMPRESOR				
$\frac{BTU}{h}$	$\frac{kJ}{h}$	$\frac{kcal}{h}$	$HP$	$HP$
72217,46465	76193,4684	18196,49728	21,16485234	28,38253473

Datos Entrada	Temperatura entrada [°C]	Temperatura Salida [°C]	Calor Especifico H2O [30°C]	Caudal H2O [30°C]	Calor Entrada al Evaporador	Caudal H2O [30°C]	Densidad H2O [30°C]	Flujo masico H2O [30°C]	Calor Entrada al Evaporador
Agua Taconizada	30	10	4,178 $\left[\frac{kJ}{kg \cdot K}\right]$	30 Lpm	83,56 $\left[\frac{kJ}{kg}\right]$	1,8 $\frac{m^3}{h}$	999,71 $\frac{kg}{m^3}$	1792,278 $\frac{kg}{h}$	149762,74984 $\left[\frac{kJ}{h}\right]$

INTERPOLACIÓN ESTADO 3 (Según Tablas DuPont)			
Temperatura [°C]	73	73,94285714	74
Presión [kPa]	3570,8	3637,311429	3642
Entalpía $\left[\frac{kJ}{kg}\right]$	333,1	335,74	335,9
Entropía $\left[\frac{kJ}{kg \cdot K}\right]$	1,4189	1,42416	1,4246

INTERPOLACIÓN ESTADO 2 PRESIÓN INFERIOR = 3600kPa (Según Tablas Dupont)			
Temperatura [°C]	95	96,49456522	100
Entalpía $\left[\frac{kJ}{kg}\right]$	459,5	461,56	466,4
Entropía $\left[\frac{kJ}{kg \cdot K}\right]$	1,7776	1,7831	1,796

INTERPOLACIÓN ESTADO 2 PRESIÓN SUPERIOR = 3800kPa (Según Tablas Dupont)			
Temperatura [°C]	95	99,84615385	100
Entalpía $\left[\frac{kJ}{kg}\right]$	455,9	462,88	463,1
Entropía $\left[\frac{kJ}{kg \cdot K}\right]$	1,7642	1,7831	1,7837

INTERPOLACIÓN ESTADO 2 ENTROPIA = 1,7831 (Definitiva)			
Temperatura [°C]	96,49456522	97,13021794	99,84615385
Presión [kPa]	3600	3637,311429	3800
Entalpía $\left[\frac{kJ}{kg}\right]$	461,56	461,81	462,88

Datos Tablas DuPont R-407C	TEMPERATURA	P	P <sub>g</sub>	M	M <sub>g</sub>	h <sub>g</sub>	v <sub>f</sub>	v <sub>fg</sub>	h <sub>fg</sub>
	10	765,8	632,8	214,7	204,6	419,3	1,0522	0,7309	1,7831

## Anexo 17. Cálculos termodinámicos refrigerante R-422A

Refrigerante R-422A	Estado 1 (Vapor Saturado)	Estado 2 (Vapor Sobrecalentado)	Estado 3 (Líquido Saturado)	Estado 4 (Mezcla)
Temperatura $[^{\circ}\text{C}]$	15	64,8576562	59,015	15
Presión $[\text{kPa}]$	930,8	2864,639	2864,639	930,8
Entalpia $\left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}\right]$	351,9	369,87	289,33	289,33
Entropía $\left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}\right]$	1,5294	1,5294	1,286985	1,311314032
CALIDAD MEZCLA			0,524867324	

$W_C = h_2 - h_1$	$Q_1 = h_2 - h_3$	$Q_2 = h_1 - h_4$	$C_R = \frac{Q_2}{(W_{NET})}$	$\dot{m}_{REF} = \frac{\dot{Q}_{R20}}{Q_2}$	Toneladas de refrigeración consumidas por el sistema	Valor de Toneladas de Refrigeración	Valor de Chiller
17,3684 $\left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}\right]$	80,64 $\left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}\right]$	62,67 $\left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}\right]$	3,4882	1792,278 $\frac{\text{kg}}{\text{h}}$	9	5	1.700.000 $\frac{\text{kg}}{\text{h}}$ 15.081.941

POTENCIA COMPRESOR				
$\frac{BTU}{h}$	$\frac{kJ}{h}$	$\frac{kcal}{h}$	$kW$	$HP$
30520,48467	32200,8201	7691,83374	8,94467224	11,99000315

Datos Entrada	Temperatura entrada $[^{\circ}\text{C}]$	Temperatura Salida $[^{\circ}\text{C}]$	Calor Especifico H2O $[30^{\circ}\text{C}]$	Caudal H2O $[30^{\circ}\text{C}]$	Calor Entrada al Evaporador	Caudal H2O $[30^{\circ}\text{C}]$	Densidad H2O $[30^{\circ}\text{C}]$	Peso maxico H2O $[30^{\circ}\text{C}]$	Calor Entrada al Evaporador
Agua Suavizada	30	15	4,179 $\left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}\right]$	30 Lpm	62,67 $\left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}\right]$	1,8 $\frac{\text{m}^3}{h}$	999,71 $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	1792,278 $\frac{\text{kg}}{h}$	112332,0625 $\left[\frac{\text{kJ}}{h}\right]$

INTERPOLACIÓN ESTADO 3 (Según Tablas DuPont)			
Temperatura $[^{\circ}\text{C}]$	59	59,015	60
Presión $[\text{kPa}]$	2863,7	2864,639	2926,3
Entalpia $\left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}\right]$	289,2	289,33	291,2
Entropía $\left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}\right]$	1,2869	1,286985	1,2928

INTERPOLACIÓN ESTADO 2 PRESIÓN INFERIOR = 3800KPa (Según Tablas DuPont)			
Temperatura $[^{\circ}\text{C}]$	60	63,6468864	65
Entalpia $\left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}\right]$	362,9	369,53	372
Entropía $\left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}\right]$	1,5095	1,5294	1,5368

INTERPOLACIÓN ESTADO 2 PRESIÓN SUPERIOR = 3000KPa (Según Tablas DuPont)			
Temperatura $[^{\circ}\text{C}]$	65	67,38776952	70
Entalpia $\left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}\right]$	366,2	370,56	375,3
Entropía $\left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}\right]$	1,5165	1,5294	1,5434

INTERPOLACIÓN ESTADO 2 ENTROPÍA = 1,5302 (Definitiva)			
$[^{\circ}\text{C}]$	63,6468864	64,8576562	67,38776952
$[\text{kPa}]$	2800	2864,639	3000
$\left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}\right]$	369,53	369,87	370,56

Datos Tablas DuPont R-422A	TEMPERATURA	P	Pg	M	Mg	hg	sf	vfg	vg
	15	973,2	930,8	220	133,9	351,9	1,0704	0,4590	1,5294

## Anexo 18. Cálculos termodinámicos refrigerante R-22

Refrigerante R-22	Estado 1 (Vapor Saturado)	Estado 2 (Vapor Sobrecalentado)	Estado 3 (Líquido Saturado)	Estado 4 (Mezcla)
Temperatura $[^{\circ}\text{C}]$	5	128,5650439	91,80789474	5
Presión $[\text{kPa}]$	584,1	4773,902632	4773,902632	584,1
Entalpia $\left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}\right]$	406,8	461,08	344,07	344,07
Entropía $\left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}\right]$	1,744	1,744	1,432078947	1,518246939
CALIDAD MEZCLA			0,687755302	

$W_C = h_2 - h_1$	$Q_1 = h_2 - h_3$	$Q_2 = h_1 - h_4$	$C_R = \frac{Q_2}{(W_{NET})}$	$\dot{m}_{REF} = \frac{\dot{Q}_{R20}}{Q_2}$	Toneladas de refrigeración consumidas por el sistema	Valor de Toneladas de Refrigeración	Valor de Chiller
54,2764 $\left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}\right]$	117,01 $\left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}\right]$	62,73 $\left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}\right]$	1,1558	1792,278 $\frac{\text{kg}}{h}$	9	5	1.700.000 $\frac{\text{kg}}{h}$ 15.096.382

POTENCIA COMPRESOR				
$\frac{BTU}{h}$	$\frac{kJ}{h}$	$\frac{kcal}{h}$	$kW$	$HP$
92202,18786	97270,4703	23234,56346	27,0217973	36,23682736

Datos Entrada	Temperatura entrada $[^{\circ}\text{C}]$	Temperatura Salida $[^{\circ}\text{C}]$	Calor Especifico H2O $[20^{\circ}\text{C}]$	Caudal H2O $[30^{\circ}\text{C}]$	Calor Entrada al Evaporador	Caudal H2O $[30^{\circ}\text{C}]$	Densidad H2O $[30^{\circ}\text{C}]$	Peso maxico H2O $[30^{\circ}\text{C}]$	Calor Entrada al Evaporador
Agua Suavizada	20	5	4,182 $\left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}\right]$	30 Lpm	62,73 $\left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}\right]$	1,8 $\frac{\text{m}^3}{h}$	999,71 $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	1792,278 $\frac{\text{kg}}{h}$	112429,59894 $\left[\frac{\text{kJ}}{h}\right]$

INTERPOLACIÓN ESTADO 3 (Según Tablas DuPont)			
Temperatura $[^{\circ}\text{C}]$	92	91,80789474	94
Presión $[\text{kPa}]$	4702	4773,902632	4791
Entalpia $\left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}\right]$	341	344,07	344,8
Entropía $\left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}\right]$	1,424	1,4320789	1,434

INTERPOLACIÓN ESTADO 2 PRESIÓN INFERIOR = 4700KPa (Según Tablas DuPont)			
Temperatura $[^{\circ}\text{C}]$	125	127,3333333	130
Entalpia $\left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}\right]$	457,7	460,50	463,7
Entropía $\left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}\right]$	1,7370	1,744	1,752

INTERPOLACIÓN ESTADO 2 PRESIÓN SUPERIOR = 4800KPa (Según Tablas DuPont)			
Temperatura $[^{\circ}\text{C}]$	125	129	130
Entalpia $\left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}\right]$	456,4	461,28	462,5
Entropía $\left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}\right]$	1,732	1,744	1,747

INTERPOLACIÓN ESTADO 2 ENTROPÍA = 1,744 (Definitiva)			
Temperatura $[^{\circ}\text{C}]$	127,3333333	128,5650439	129
Presión $[\text{kPa}]$	4700	4773,902632	4800
Entalpia $\left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}\right]$	460,50	461,08	461,28

Datos Tablas DuPont R-22	TEMPERATURA	P	M	Mg	hg	sf	vfg	vg
	5	584,1	205,9	200,9	406,8	1,0210	0,7230	1,744



**Anexo 19. Tabla de valores típicos para el coeficiente de transferencia de calor por convección**

Medio	Coeficiente de transferencia de calor $h$ ( $\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$ )
Aire (convección natural)	5-25
Aire/vapor supercalentado (convección forzada)	20-300
Petróleo (convección forzada)	60-1800
Agua (convección forzada)	300-6000
Agua (en ebullición)	3000-60.000
Vapor (en condensación)	6000-120.000

## Anexo 20. Eficiencia y áreas de superficies de configuración comunes de aletas

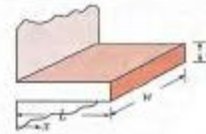
### Aletas rectangulares rectas

$$m = \sqrt{2h/kt}$$

$$L_c = L + t/2$$

$$A_{\text{aleta}} = 2wL_c$$

$$\eta_{\text{aleta}} = \frac{\tanh mL_c}{mL_c}$$

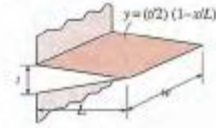


### Aletas triangulares rectas

$$m = \sqrt{2h/kt}$$

$$A_{\text{aleta}} = 2w\sqrt{L^2 + (t/2)^2}$$

$$\eta_{\text{aleta}} = \frac{1}{mL} I_1(2mL)$$



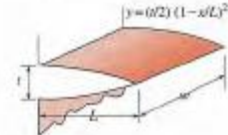
### Aletas parabólicas rectas

$$m = \sqrt{2h/kt}$$

$$A_{\text{aleta}} = wL[C_1 + (L/t)\ln(t/L + C_1)]$$

$$C_1 = \sqrt{1 + (t/L)^2}$$

$$\eta_{\text{aleta}} = \frac{2}{1 + \sqrt{(2mL)^2 + 1}}$$



### Aletas circulares de perfil rectangular

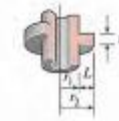
$$m = \sqrt{2h/kt}$$

$$r_{2c} = r_2 + t/2$$

$$A_{\text{aleta}} = 2\pi(r_{2c}^2 - r_1^2)$$

$$\eta_{\text{aleta}} = \frac{K_1(mr_1)I_1(mr_{2c}) - I_1(mr_1)K_1(mr_{2c})}{I_0(mr_1)K_1(mr_{2c}) + K_0(mr_1)I_1(mr_{2c})}$$

$$C_2 = \frac{2r_1/m}{r_{2c}^2 - r_1^2}$$



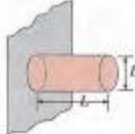
### Aletas de espiga de perfil rectangular

$$m = \sqrt{4h/kD}$$

$$L_c = L + D/4$$

$$A_{\text{aleta}} = \pi D L_c$$

$$\eta_{\text{aleta}} = \frac{\tanh mL_c}{mL_c}$$

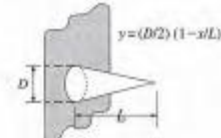


### Aletas de espiga de perfil triangular

$$m = \sqrt{4h/kD}$$

$$A_{\text{aleta}} = \frac{\pi D}{2} \sqrt{L^2 + (D/2)^2}$$

$$\eta_{\text{aleta}} = \frac{2}{mL} I_2(2mL)$$



### Aletas de espiga de perfil parabólico

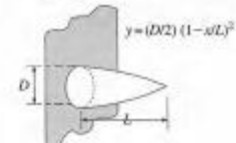
$$m = \sqrt{4h/kD}$$

$$A_{\text{aleta}} = \frac{\pi L^3}{8D} [C_3 C_4 - \frac{L}{2D} \ln(2DC_4/L + C_3)]$$

$$C_3 = 1 + 2(D/L)^2$$

$$C_4 = \sqrt{1 + (D/L)^2}$$

$$\eta_{\text{aleta}} = \frac{2}{1 + \sqrt{(2mL/3)^2 + 1}}$$

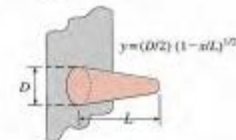


### Aletas de espiga de perfil parabólico (punta truncada)

$$m = \sqrt{4h/kD}$$

$$A_{\text{aleta}} = \frac{\pi D^3}{96L^2} \left\{ [16(L/D)^2 + 1]^{3/2} - 1 \right\}$$

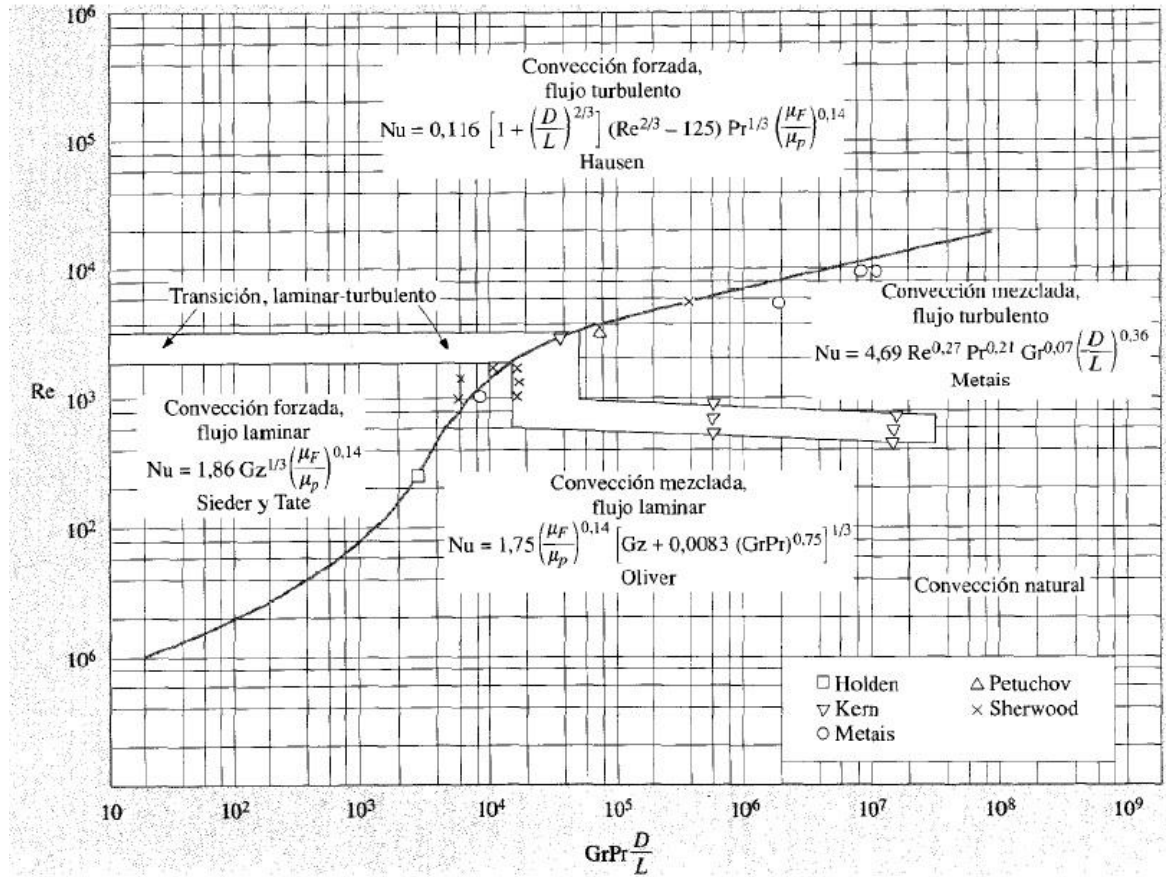
$$\eta_{\text{aleta}} = \frac{3}{2mL} I_0(4mL/3)$$



**Anexo 21. Tabla de propiedades del aire a 1 atm**

Temp., $T, ^\circ\text{C}$	Densidad, $\rho, \text{kg/m}^3$	Calor específico, $c_p, \text{J/kg} \cdot \text{K}$	Conductividad térmica, $k, \text{W/m} \cdot \text{K}$	Difusividad térmica, $\alpha, \text{m}^2/\text{s}^2$	Viscosidad dinámica, $\mu, \text{kg/m} \cdot \text{s}$	Viscosidad cinemática, $\nu, \text{m}^2/\text{s}$	Número de Prandtl, Pr
-150	2.866	983	0.01171	$4.158 \times 10^{-6}$	$8.636 \times 10^{-6}$	$3.013 \times 10^{-6}$	0.7246
-100	2.038	966	0.01582	$8.036 \times 10^{-6}$	$1.189 \times 10^{-5}$	$5.837 \times 10^{-6}$	0.7263
-50	1.582	999	0.01979	$1.252 \times 10^{-5}$	$1.474 \times 10^{-5}$	$9.319 \times 10^{-6}$	0.7440
-40	1.514	1002	0.02057	$1.356 \times 10^{-5}$	$1.527 \times 10^{-5}$	$1.008 \times 10^{-5}$	0.7436
-30	1.451	1004	0.02134	$1.465 \times 10^{-5}$	$1.579 \times 10^{-5}$	$1.087 \times 10^{-5}$	0.7425
-20	1.394	1005	0.02211	$1.578 \times 10^{-5}$	$1.630 \times 10^{-5}$	$1.169 \times 10^{-5}$	0.7408
-10	1.341	1006	0.02288	$1.696 \times 10^{-5}$	$1.680 \times 10^{-5}$	$1.252 \times 10^{-5}$	0.7387
0	1.292	1006	0.02364	$1.818 \times 10^{-5}$	$1.729 \times 10^{-5}$	$1.338 \times 10^{-5}$	0.7362
5	1.269	1006	0.02401	$1.880 \times 10^{-5}$	$1.754 \times 10^{-5}$	$1.382 \times 10^{-5}$	0.7350
10	1.246	1006	0.02439	$1.944 \times 10^{-5}$	$1.778 \times 10^{-5}$	$1.426 \times 10^{-5}$	0.7336
15	1.225	1007	0.02476	$2.009 \times 10^{-5}$	$1.802 \times 10^{-5}$	$1.470 \times 10^{-5}$	0.7323
20	1.204	1007	0.02514	$2.074 \times 10^{-5}$	$1.825 \times 10^{-5}$	$1.516 \times 10^{-5}$	0.7309
25	1.184	1007	0.02551	$2.141 \times 10^{-5}$	$1.849 \times 10^{-5}$	$1.562 \times 10^{-5}$	0.7296
30	1.164	1007	0.02588	$2.208 \times 10^{-5}$	$1.872 \times 10^{-5}$	$1.608 \times 10^{-5}$	0.7282
35	1.145	1007	0.02625	$2.277 \times 10^{-5}$	$1.895 \times 10^{-5}$	$1.655 \times 10^{-5}$	0.7268
40	1.127	1007	0.02662	$2.346 \times 10^{-5}$	$1.918 \times 10^{-5}$	$1.702 \times 10^{-5}$	0.7255
45	1.109	1007	0.02699	$2.416 \times 10^{-5}$	$1.941 \times 10^{-5}$	$1.750 \times 10^{-5}$	0.7241
50	1.092	1007	0.02735	$2.487 \times 10^{-5}$	$1.963 \times 10^{-5}$	$1.798 \times 10^{-5}$	0.7228
60	1.059	1007	0.02808	$2.632 \times 10^{-5}$	$2.008 \times 10^{-5}$	$1.896 \times 10^{-5}$	0.7202
70	1.028	1007	0.02881	$2.780 \times 10^{-5}$	$2.052 \times 10^{-5}$	$1.995 \times 10^{-5}$	0.7177
80	0.9994	1008	0.02953	$2.931 \times 10^{-5}$	$2.096 \times 10^{-5}$	$2.097 \times 10^{-5}$	0.7154
90	0.9718	1008	0.03024	$3.086 \times 10^{-5}$	$2.139 \times 10^{-5}$	$2.201 \times 10^{-5}$	0.7132
100	0.9458	1009	0.03095	$3.243 \times 10^{-5}$	$2.181 \times 10^{-5}$	$2.306 \times 10^{-5}$	0.7111
120	0.8977	1011	0.03235	$3.565 \times 10^{-5}$	$2.264 \times 10^{-5}$	$2.522 \times 10^{-5}$	0.7073
140	0.8542	1013	0.03374	$3.898 \times 10^{-5}$	$2.345 \times 10^{-5}$	$2.745 \times 10^{-5}$	0.7041
160	0.8148	1016	0.03511	$4.241 \times 10^{-5}$	$2.420 \times 10^{-5}$	$2.975 \times 10^{-5}$	0.7014
180	0.7788	1019	0.03646	$4.593 \times 10^{-5}$	$2.504 \times 10^{-5}$	$3.212 \times 10^{-5}$	0.6992
200	0.7459	1023	0.03779	$4.954 \times 10^{-5}$	$2.577 \times 10^{-5}$	$3.455 \times 10^{-5}$	0.6974
250	0.6746	1033	0.04104	$5.890 \times 10^{-5}$	$2.760 \times 10^{-5}$	$4.091 \times 10^{-5}$	0.6946
300	0.6158	1044	0.04418	$6.871 \times 10^{-5}$	$2.934 \times 10^{-5}$	$4.765 \times 10^{-5}$	0.6935
350	0.5664	1056	0.04721	$7.892 \times 10^{-5}$	$3.101 \times 10^{-5}$	$5.475 \times 10^{-5}$	0.6937
400	0.5243	1069	0.05015	$8.951 \times 10^{-5}$	$3.261 \times 10^{-5}$	$6.219 \times 10^{-5}$	0.6948
450	0.4880	1081	0.05298	$1.004 \times 10^{-4}$	$3.415 \times 10^{-5}$	$6.997 \times 10^{-5}$	0.6965
500	0.4565	1093	0.05572	$1.117 \times 10^{-4}$	$3.563 \times 10^{-5}$	$7.806 \times 10^{-5}$	0.6986
600	0.4042	1115	0.06093	$1.352 \times 10^{-4}$	$3.846 \times 10^{-5}$	$9.515 \times 10^{-5}$	0.7037
700	0.3627	1135	0.06581	$1.598 \times 10^{-4}$	$4.111 \times 10^{-5}$	$1.133 \times 10^{-4}$	0.7092
800	0.3289	1153	0.07037	$1.855 \times 10^{-4}$	$4.362 \times 10^{-5}$	$1.326 \times 10^{-4}$	0.7149
900	0.3008	1169	0.07465	$2.122 \times 10^{-4}$	$4.600 \times 10^{-5}$	$1.529 \times 10^{-4}$	0.7206
1000	0.2772	1184	0.07868	$2.398 \times 10^{-4}$	$4.826 \times 10^{-5}$	$1.741 \times 10^{-4}$	0.7260
1500	0.1990	1234	0.09599	$3.908 \times 10^{-4}$	$5.817 \times 10^{-5}$	$2.922 \times 10^{-4}$	0.7478
2000	0.1553	1264	0.11113	$5.664 \times 10^{-4}$	$6.630 \times 10^{-5}$	$4.270 \times 10^{-4}$	0.7539

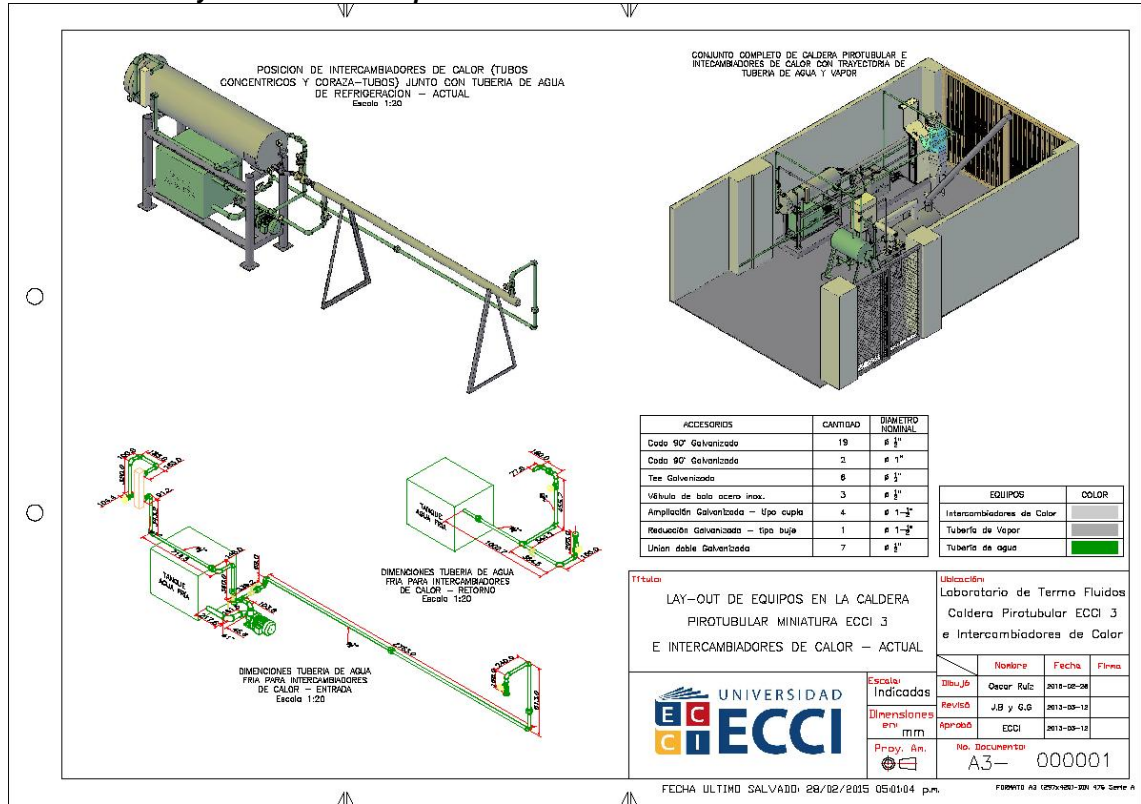
**Anexo 22. Regímenes de convección natural, forzada, mezclada para flujos en tubos horizontales**



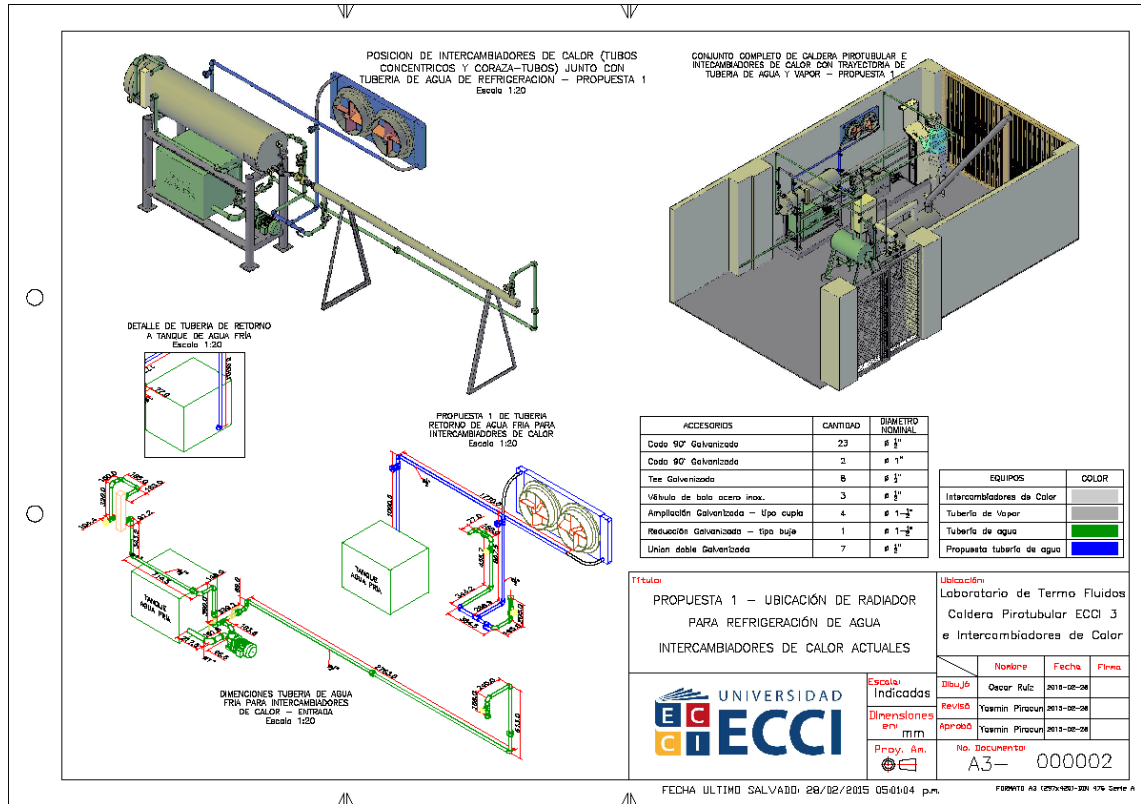
**Anexo 23. Cálculos termodinámico intercambiador de calor (radiador)**

T1	16	Calculo de area 1	0,0072
T2	40	H (altura aleta)	0,009
t1	46	L (longitud)	0,8
t2	18	Area total	0,29097728
Delta T1	6	Na (numero aletas radiador)	44
Delta T2	2	hr (coeficiente de conveccion de aire)	32,52368889
Calculo de area 2	0,00058688	NUT forma triangular	3,11
Z (numero triangulos aletas)	160	K aire	0,026
X (inclinación triangulo aleta)	0,00917	Espacio entre triangulo (aleta)	0,0035
e (espesor de la aleta)	0,0004	DH aire	0,002486188
Calculo del caudal Va (m/s)	1,97352524	U (coeficiente global de transferencia de calor)	42,9693065
Ca (caudal liquido refrigeración)	0,0005	AFC (area contacto fluido caliente)	6,584038
ati (area transversal ingreso)	0,00025335	Aff (area de contacto de fluido frio)	13,618176
D (diametro tuberia radiador)	0,0127	Aaleta	0,031
ha (coeficiente de conveccion del agua)	118,961919	espesor tubo	0,00025
a	0,0025	K aluminio	232
b	0,0127	Caida de presion A/REFRI	1,691249874
Ntubos	86	densidad aire a 20	1,225
DH agua	0,35927632	velocidad aire de refriger	6,1
NUT forma rectangular	73,69	Re	1196,2
K agua	0,58	frRe	53
U (coeficiente global de transferencia de calor)	42,9693065	fr	0,044306972
AFC (area contacto fluido caliente)	6,584038	Potencia del ventilador	62,8542304
Aff (area de contacto de fluido frio)	13,618176	mr	2,3194
Aaleta	0,031	Qcaudal aire refrigeracion	1,893387755
espesor tubo	0,00025	factor	0,1175
K aluminio	232	presion estatica en in H2 O	8

## Anexo 24. Lay-out de la caldera piro tubular miniatura ECCI 3 e intercambiadores de calor actual

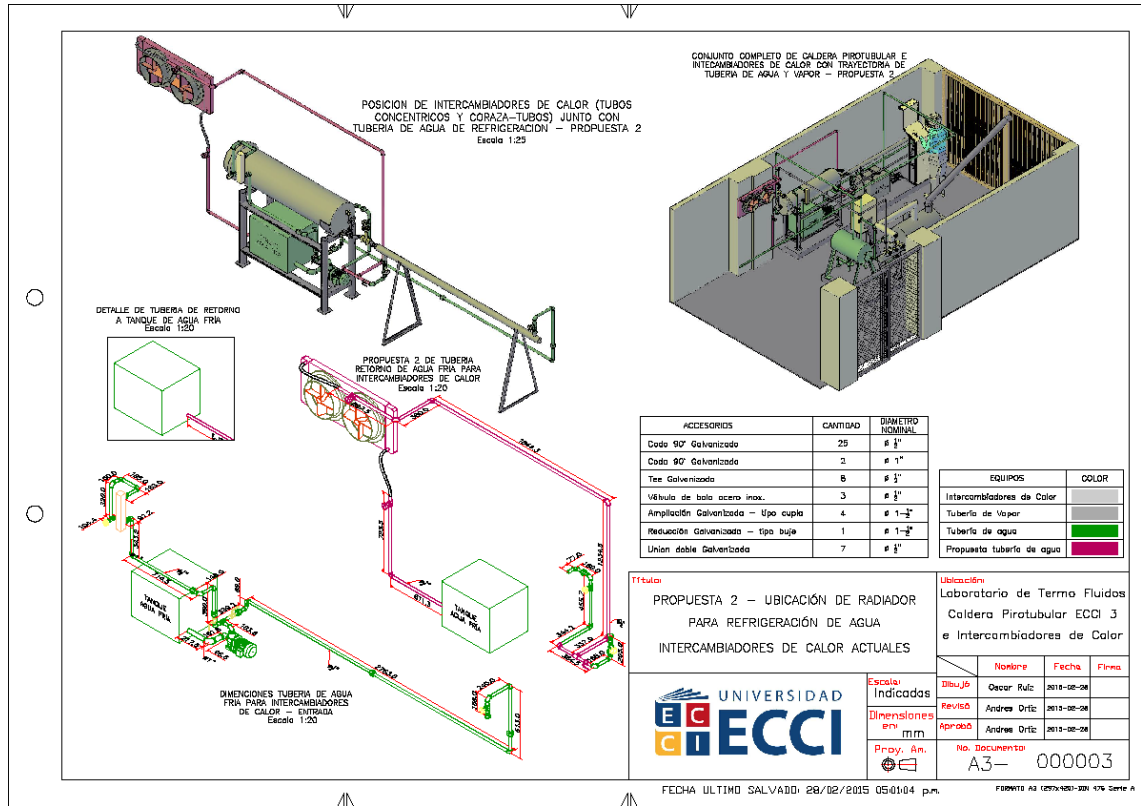


**Anexo 25. Propuesta 1.ubicacion de radiador para refrigeración de agua intercambiadores de calor actual**



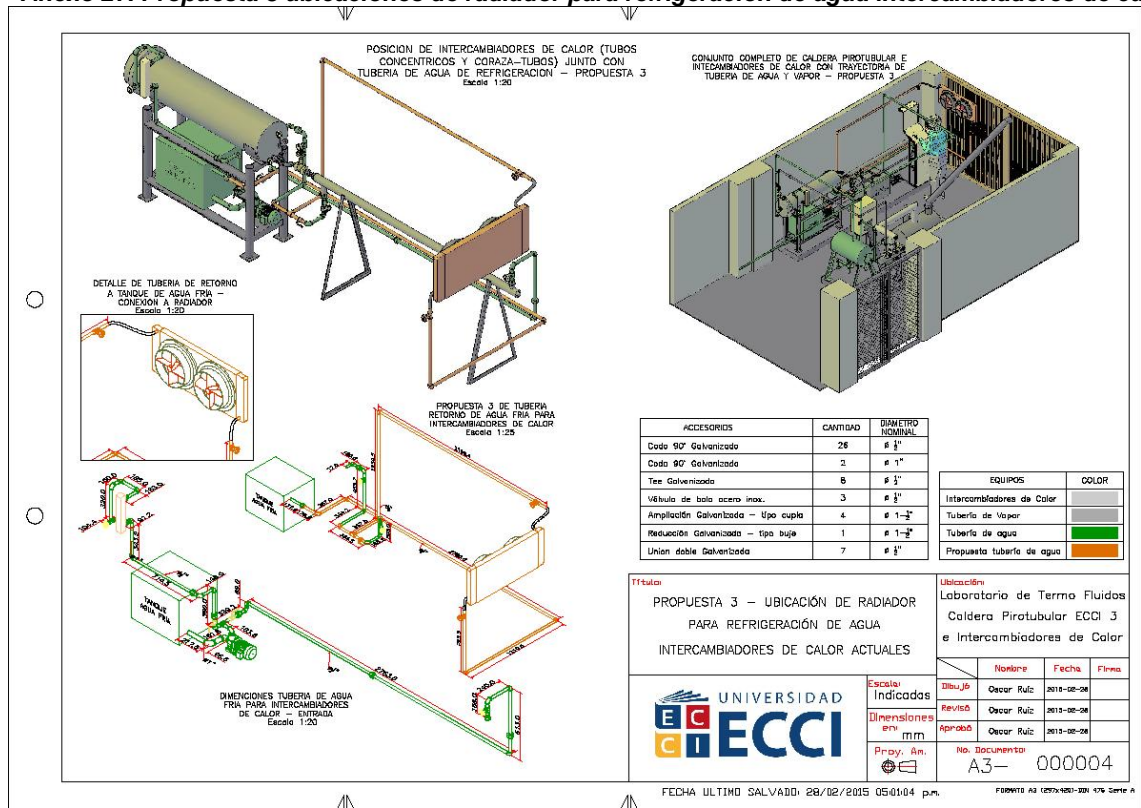


## Anexo 26. Propuesta 2. Ubicación de radiador para refrigeración de agua de los intercambiadores de calor

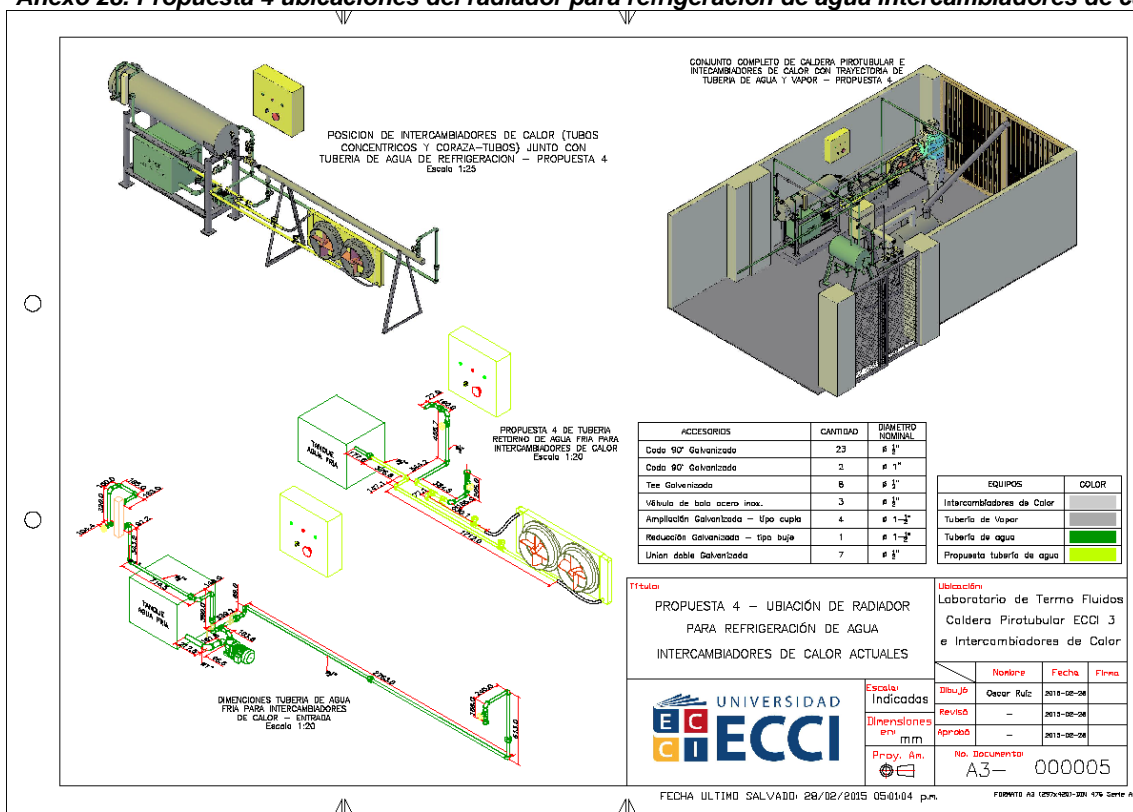




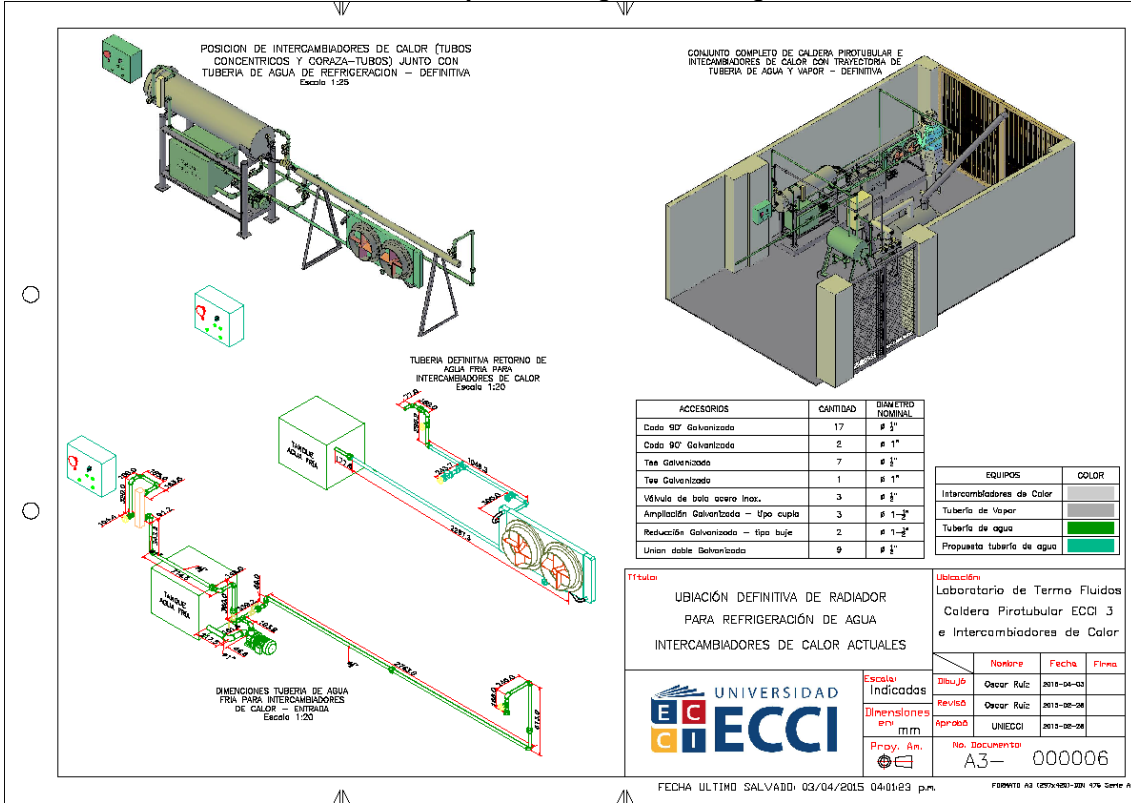
## Anexo 27. Propuesta 3 ubicaciones de radiador para refrigeración de agua intercambiadores de calor



## Anexo 28. Propuesta 4 ubicaciones del radiador para refrigeración de agua intercambiadores de calor



## Anexo 29. Ubicación definitiva radiador para la refrigeración de agua intercambiadores de calor actual



### Anexo 30. Cálculo de pérdidas de tubería condición inicial

Diametro Tuberia 1/2"	0,0127	Area	0,000126677	Diametro Intercambiador Tubos con	0,0468376	Area	0,002890936
Caudal Bomba	35	0,000583333		Caudal Bomba	35	0,000583333	
Velocidad 1/2"	4,60489223			Velocidad 1/2"	0,201780063		
Numero Reynolds	57335,42286			Numero Reynolds	9265,582234		
Viscosidad Cinematica	0,00000102			Viscosidad Cinematica	0,00000102		
Factor Friccion	0,041413256			Factor Friccion	0,036475111		
Perdidas por ecuacion de Darcy 1/2"	32,57997308			Perdidas por ecuacion de Darcy 1/2"	0,003316319		
Longitud de tuberia	9,2349			Longitud de Intercambiador	2,05		
Diametro Tuberia 1"	0,0254	Area	0,000506707	Diametro Intercambiador Coraza-Tub	0,378	Area	0,0455
Caudal Bomba	35	0,000583333		Caudal Bomba	35	0,000583333	
Velocidad 1"	1,151223057			Velocidad 1/2"	0,012820513		
Numero Reynolds	28667,71143			Numero Reynolds	4751,131222		
Viscosidad Cinematica	0,00000102			Viscosidad Cinematica	0,00000102		
Factor Friccion	0,035158652			Factor Friccion	0,038934474		
Perdidas por ecuacion de Darcy 1"	0,039844193			Perdidas por ecuacion de Darcy 1/2"	1,11426E-06		
Longitud de tuberia	0,4257			Longitud de Intercambiador	1,29		
	Cantidad	Longitud Equivalente en Diametros (Le/D)	Factor Fricción (Ft)	Velocidad	Valor Perdida		0,2605
						Altura Estatica	
Calculo perdidas Codo 90° 1/2"	19	30	0,027	4,60489223	16,65027803	Sumatoria de Perdidas Dinamicas	67,3761273
Calculo perdidas Codo 90° 1"	2	30	0,023	1,151223057	0,093312962	Altura Bombeo	67,6366273
Calculo perdidas Tee 1/2"	6	20	0,027	4,60489223	3,505321691		
Calculo perdidas Válvula Tipo bola 1/2"	3	150	0,027	4,60489223	13,14495634		
	Cantidad	Coefficiente de Dilatación (K)	Velocidad	Valor Perdida			
Calculo perdidas Reducción 1" a 1/2"	3	0,3	1,151223057	0,060856279			
Calculo perdidas Ampliación 1/2" a 1"	2	0,6	4,60489223	1,298267293			

### Anexo 31. Cálculo de pérdidas de tubería propuesta 1

Diametro Tubería 1/2"	0,0127	Área	0,000126677	Diametro Intercambiador Tubos concéntricos	0,0468376	Área	0,002890936
Caudal Bomba	35	0,000583333		Caudal Bomba	35	0,000583333	
Velocidad 1/2"	4,60489223			Velocidad 1/2"	0,201780063		
Numero Reynolds	57335,42286			Numero Reynolds	9265,582234		
Viscosidad Cinematica	0,00000102			Viscosidad Cinematica	0,00000102		
Factor Friccion	0,041413256			Factor Friccion	0,036475111		
Pérdidas por ecuacion de Darcy 1/2"	46,88462357			Pérdidas por ecuacion de Darcy 1/2"	0,003316319		
Longitud de tubería	13,2896			Longitud de Intercambiador	2,05		
Diametro Tubería 1"	0,0254	Área	0,000506707	Diametro Intercambiador Coraza-Tubos	0,378	Área	0,0455
Caudal Bomba	35	0,000583333		Caudal Bomba	35	0,000583333	
Velocidad 1"	1,151223057			Velocidad 1/2"	0,012820513		
Numero Reynolds	28667,71143			Numero Reynolds	4751,131222		
Viscosidad Cinematica	0,00000102			Viscosidad Cinematica	0,00000102		
Factor Friccion	0,035158652			Factor Friccion	0,038934474		
Pérdidas por ecuacion de Darcy 1"	0,039844193			Pérdidas por ecuacion de Darcy 1/2"	1,11426E-06		
Longitud de tubería	0,4257			Longitud de Intercambiador	1,29		
	Cantidad	Longitud Equivalente en Diametros (Le/D)	Factor Fricción (Ft)	Velocidad	Valor Perdida		0,2605
Calculo perdidas Codo 90° 1/2"	23	30	0,027	4,60489223	20,15559972	Altura Estática	
Calculo perdidas Codo 90° 1"	2	30	0,023	1,151223057	0,093312962	Sumatoria de Perdidas Dinámicas	86,35454004
Calculo perdidas Tee 1/2"	8	20	0,027	4,60489223	4,673762254	Altura Bombeo	86,61504004
Calculo perdidas Válvula Tipo bola 1/2"	3	150	0,027	4,60489223	13,14495634		
	Cantidad	Coefficiente de Dilatación (K)	Velocidad		Valor Perdida		
Calculo perdidas Reducción 1" a 1/2"	3	0,3	1,151223057		0,060856278		
Calculo perdidas Ampliación 1/2" a 1"	2	0,6	4,60489223		1,298267293		

### Anexo 32. Cálculo de pérdidas de tubería propuesta 2

Diametro Tubería 1/2"	0,0127	Área	0,000126677	Diametro Intercambiador Tubos concéntricos	0,0468376	Área	0,002890936
Caudal Bomba	35	0,000583333		Caudal Bomba	35	0,000583333	
Velocidad 1/2"	4,60489223			Velocidad 1/2"	0,201780063		
Numero Reynolds	57335,42286			Numero Reynolds	9265,582234		
Viscosidad Cinematica	0,00000102			Viscosidad Cinematica	0,00000102		
Factor Friccion	0,041413256			Factor Friccion	0,036475111		
Pérdidas por ecuacion de Darcy 1/2"	50,8189581			Pérdidas por ecuacion de Darcy 1/2"	0,003316319		
Longitud de tubería	14,4048			Longitud de Intercambiador	2,05		
Diametro Tubería 1"	0,0254	Área	0,000506707	Diametro Intercambiador Coraza-Tubos	0,378	Área	0,0455
Caudal Bomba	35	0,000583333		Caudal Bomba	35	0,000583333	
Velocidad 1"	1,151223057			Velocidad 1/2"	0,012820513		
Numero Reynolds	28667,71143			Numero Reynolds	4751,131222		
Viscosidad Cinematica	0,00000102			Viscosidad Cinematica	0,00000102		
Factor Friccion	0,035158652			Factor Friccion	0,038934474		
Pérdidas por ecuacion de Darcy 1"	0,039844193			Pérdidas por ecuacion de Darcy 1/2"	1,11426E-06		
Longitud de tubería	0,4257			Longitud de Intercambiador	1,29		
	Cantidad	Longitud Equivalente en Diametros (Le/D)	Factor Fricción (Ft)	Velocidad	Valor Perdida		0,2605
Calculo perdidas Codo 90° 1/2"	25	30	0,027	4,60489223	21,90826057	Altura Estática	
Calculo perdidas Codo 90° 1"	2	30	0,023	1,151223057	0,093312962	Sumatoria de Perdidas Dinámicas	92,04153542
Calculo perdidas Tee 1/2"	8	20	0,027	4,60489223	4,673762254	Altura Bombeo	92,30203542
Calculo perdidas Válvula Tipo bola 1/2"	3	150	0,027	4,60489223	13,14495634		
	Cantidad	Coefficiente de Dilatación (K)	Velocidad		Valor Perdida		
Calculo perdidas Reducción 1" a 1/2"	3	0,3	1,151223057		0,060856278		
Calculo perdidas Ampliación 1/2" a 1"	2	0,6	4,60489223		1,298267293		

### Anexo 33. Cálculo de pérdidas de tubería propuesta 3

Diametro Tubería 1/2"	0,0127	Area	0,00012667	Diametro Intercambiador	0,0468376	Area	0,002890936
Caudal Bomba	35	0,000583333		Caudal Bomba	35	0,000583333	
Velocidad 1/2"	4,60489223			Velocidad 1/2"	0,201780063		
Numero Reynolds	57335,42286			Numero Reynolds	9265,582234		
Viscosidad Cinematica	0,00000102			Viscosidad Cinematica	0,00000102		
Factor Friccion	0,041413256			Factor Friccion	0,036475111		
Pérdidas por ecuacion de Darcy 1/2"	62,79518249			Pérdidas por ecuacion d	0,003316319		
Longitud de tubería	17,7995			Longitud de Intercambias	2,05		

Diametro Tubería 1"	0,0254	Area	0,000506707	Diametro Intercambiador	0,378	Area	0,0455
Caudal Bomba	35	0,000583333		Caudal Bomba	35	0,000583333	
Velocidad 1"	1,151223057			Velocidad 1/2"	0,012820513		
Numero Reynolds	28667,71143			Numero Reynolds	4751,131222		
Viscosidad Cinematica	0,00000102			Viscosidad Cinematica	0,00000102		
Factor Friccion	0,035158652			Factor Friccion	0,038934474		
Pérdidas por ecuacion de Darcy 1"	0,039844193			Pérdidas por ecuacion d	1,11426E-06		
Longitud de tubería	0,4257			Longitud de Intercambias	1,29		

	Cantidad	Longitud Equivalente en Diametros (Le/D)	Factor Fricción (Ft)	Velocidad	Valor Perdida		0,2606
						Altura Estatica	
Calculo perdidas Codo 90° 1/2"	26	30	0,027	4,60489223	22,78459099	Sumatoria de Perdidas Dinamicas	104,8940902
Calculo perdidas Codo 90° 1"	2	30	0,023	1,151223057	0,093312962	Altura Bombeo	105,1545902
Calculo perdidas Tee 1/2"	8	20	0,027	4,60489223	4,673762254		
Calculo perdidas Válvula Tipo bola 1/2"	3	150	0,027	4,60489223	13,14495634		
	Cantidad	Coficiente de Dilatación (K)	Velocidad	Valor Perdida			
Calculo perdidas Reducción 1" a 1/2"	3	0,3	1,151223057	0,060856279			
Calculo perdidas Ampliación 1/2" a 1"	2	0,6	4,60489223	1,298267293			

### Anexo 34. Cálculo de pérdidas de tubería propuesta 4

Diametro Tubería 1/2"	0,0127	Area	0,000126677	Diametro Intercambiador Tubos concéntricos	0,0468376	Area	0,002890936
Caudal Bomba	35	0,000583333		Caudal Bomba	35	0,000583333	
Velocidad 1/2"	4,60489223			Velocidad 1/2"	0,201780063		
Numero Reynolds	57335,42286			Numero Reynolds	9265,582234		
Viscosidad Cinematica	0,00000102			Viscosidad Cinematica	0,00000102		
Factor Friccion	0,041413256			Factor Friccion	0,036475111		
Pérdidas por ecuacion de Darcy 1/2"	41,40958872			Pérdidas por ecuacion de Darcy 1/2"	0,003316319		
Longitud de tubería	11,7374			Longitud de Intercambiador	2,05		
Diametro Tubería 1"	0,0254	Area	0,000506707	Diametro Intercambiador Coraza-Tubos	0,378	Area	0,0455
Caudal Bomba	35	0,000583333		Caudal Bomba	35	0,000583333	
Velocidad 1"	1,151223057			Velocidad 1/2"	0,012820513		
Numero Reynolds	28667,71143			Numero Reynolds	4751,131222		
Viscosidad Cinematica	0,00000102			Viscosidad Cinematica	0,00000102		
Factor Friccion	0,035158652			Factor Friccion	0,038934474		
Pérdidas por ecuacion de Darcy 1"	0,039844193			Pérdidas por ecuacion de Darcy 1/2"	1,11426E-06		
Longitud de tubería	0,4257			Longitud de Intercambiador	1,29		
	Cantidad	Longitud Equivalente en Diametros (Le/D)	Factor Fricción (Ft)	Velocidad	Valor Perdida	Altura Estatica	0,2605
Calculo perdidas Codo 90° 1/2"	23	30	0,027	4,60489223	20,15559972	Sumatoria de Perdidas Dinamicas	80,87850519
Calculo perdidas Codo 90° 1"	2	30	0,023	1,151223057	0,093312962	Altura Bombeo	81,13905519
Calculo perdidas Tee 1/2"	8	20	0,027	4,60489223	4,673762254		
Calculo perdidas Válvula Tipo bola 1/2"	3	150	0,027	4,60489223	13,14495634		
	Cantidad	Coefficiente de Dilatación (K)	Velocidad	Valor Perdida			
Calculo perdidas Reducción 1" a 1/2"	3	0,3	1,151223057	0,060856279			
Calculo perdidas Ampliación 1/2" a 1"	2	0,6	4,60489223	1,298267293			

### Anexo 35. Cálculo de pérdidas de tubería, montaje definitivo

Diametro Tubería 1/2"	0,0127	Area	0,000126677	Diametro Intercambiador	0,0468376	Area	0,002890936
Caudal Bomba	35	0,000583333		Caudal Bomba	35	0,000583333	
Velocidad 1/2"	4,60489223			Velocidad 1/2"	0,201780063		
Numero Reynolds	57335,42286			Numero Reynolds	9265,582234		
Viscosidad Cinematica	0,00000102			Viscosidad Cinematica	0,00000102		
Factor Friccion	0,041413256			Factor Friccion	0,036475111		
Pérdidas por ecuacion de Darcy 1/2"	40,18087314			Pérdidas por ecuacion de Darcy 1/2"	0,003316319		
Longitud de tubería	11,3894			Longitud de Intercambiador	2,05		
Diametro Tubería 1"	0,0254	Area	0,000506707	Diametro Intercambiador	0,378	Area	0,0455
Caudal Bomba	35	0,000583333		Caudal Bomba	35	0,000583333	
Velocidad 1"	1,151223057			Velocidad 1/2"	0,012820513		
Numero Reynolds	28667,71143			Numero Reynolds	4751,131222		
Viscosidad Cinematica	0,00000102			Viscosidad Cinematica	0,00000102		
Factor Friccion	0,035158652			Factor Friccion	0,038934474		
Pérdidas por ecuacion de Darcy 1"	0,039844193			Pérdidas por ecuacion de Darcy 1/2"	1,11426E-06		
Longitud de tubería	0,4257			Longitud de Intercambiador	1,29		
	Cantidad	Longitud Equivalente en Diametros (Le/D)	Factor Fricción (Ft)	Velocidad	Valor Perdida	Altura Estatica	0,2605
Calculo perdidas Codo 90° 1/2"	17	30	0,027	4,60489223	14,89761718	Sumatoria de Perdidas Dinamicas	74,30625594
Calculo perdidas Codo 90° 1"	2	30	0,023	1,151223057	0,093312962	Altura Bombeo	74,56675594
Calculo perdidas Tee 1/2"	7	20	0,027	4,60489223	4,089541972		
Calculo perdidas Tee 1"	1	20	0,023	4,60489223	0,497669129		
Calculo perdidas Válvula Tipo bola 1/2"	3	150	0,027	4,60489223	13,14495634		
	Cantidad	Coefficiente de Dilatación (K)	Velocidad	Valor Perdida			
Calculo perdidas Reducción 1" a 1/2"	3	0,3	1,151223057	0,060856279			
Calculo perdidas Ampliación 1/2" a 1"	2	0,6	4,60489223	1,298267293			

**Anexo 36. Rugosidad de conducto valores de diseño**

<b>Material</b>	<b>Rugosidad, <math>\epsilon</math> (m)</b>	<b>Rugosidad, <math>\epsilon</math> (pie)</b>
Vidrio, plástico	Suavidad	Suavidad
Cobre, latón, plomo (tubería)	$1.5 \times 10^{-6}$	$5 \times 10^{-6}$
Hierro fundido: sin revestir	$2.4 \times 10^{-4}$	$8 \times 10^{-4}$
Hierro fundido: revestido de asfalto	$1.2 \times 10^{-4}$	$4 \times 10^{-4}$
Acero comercial o acero soldado	$4.6 \times 10^{-6}$	$1.5 \times 10^{-4}$
Hierro forjado	$4.6 \times 10^{-6}$	$1.5 \times 10^{-4}$
Acero remachado	$1.8 \times 10^{-3}$	$6 \times 10^{-3}$
Concreto	$1.2 \times 10^{-3}$	$4 \times 10^{-3}$



**Anexo 37. Resistencia en válvulas y juntas expresadas con longitud equivalente en diámetros de ductos**

Tipo	Longitud equivalente en diámetros de conducto, $L/D$
Válvula de globo—completamente abierta	340
Válvula de ángulo—completamente abierta	150
Válvula de compuerta—completamente abierta	8
—3/4 abierta	35
—1/2 abierta	160
—1/4 abierta	900
Válvula de verificación—tipo giratorio	100
Válvula de verificación—tipo de bola	150
Válvula de mariposa—completamente abierta	45
Codo estándar de 90°	30
Codo de radio de largo de 90°	20
Codo de calle de 90°	50
Codo estándar de 45°	16
Codo de calle de 45°	26
Codo de devolución cerrada	50
Te estándar—con flujo a través de un tramo	20
Te estándar—con flujo a través de una rama	60

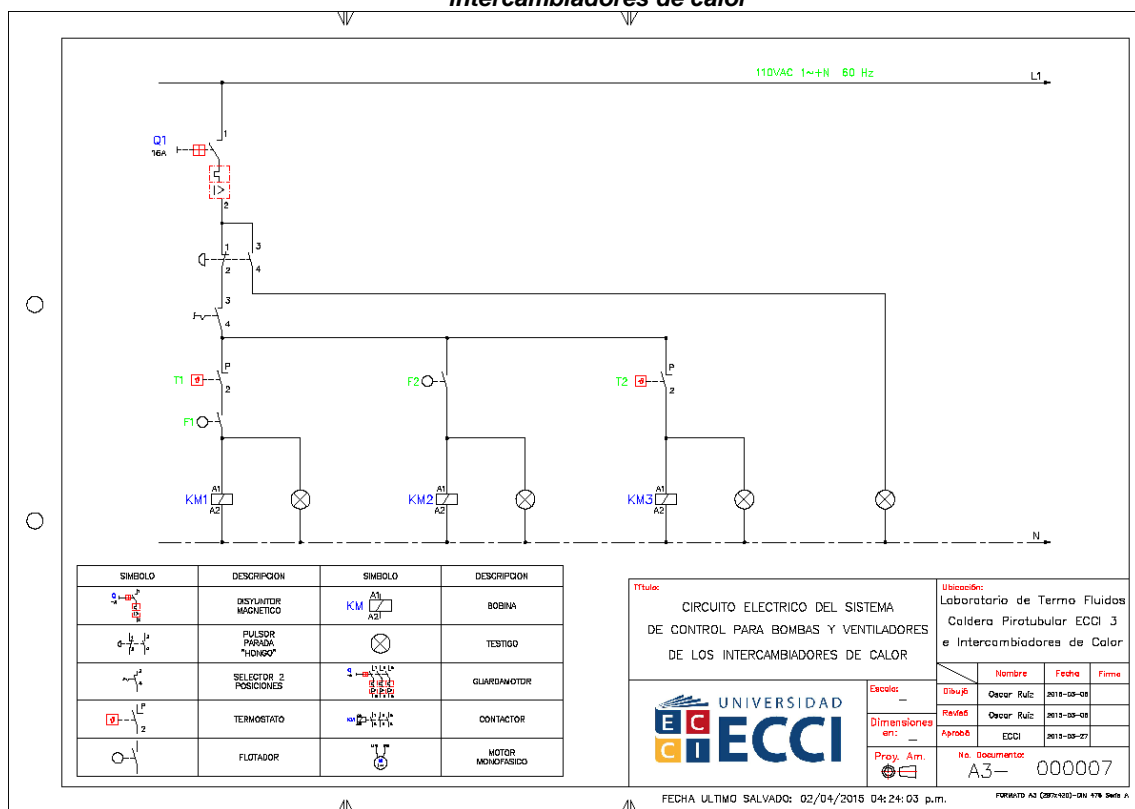
**Anexo 38. Factor de fricción en zona de turbulencia completa para ductos de acero comercial y limpio**

Tamaño de conducto nominal (pulg)	Factor de fricción, $f_r$	Tamaño de conducto nominal (pulg)	Factor de fricción, $f_r$
$\frac{1}{2}$	0.027	4	0.017
$\frac{3}{4}$	0.025	5	0.016
1	0.023	6	0.015
$1\frac{1}{4}$	0.022	8-10	0.014
$1\frac{1}{2}$	0.021	12-16	0.013
2	0.019	18-24	0.012
$2\frac{1}{2}$ , 3	0.018		

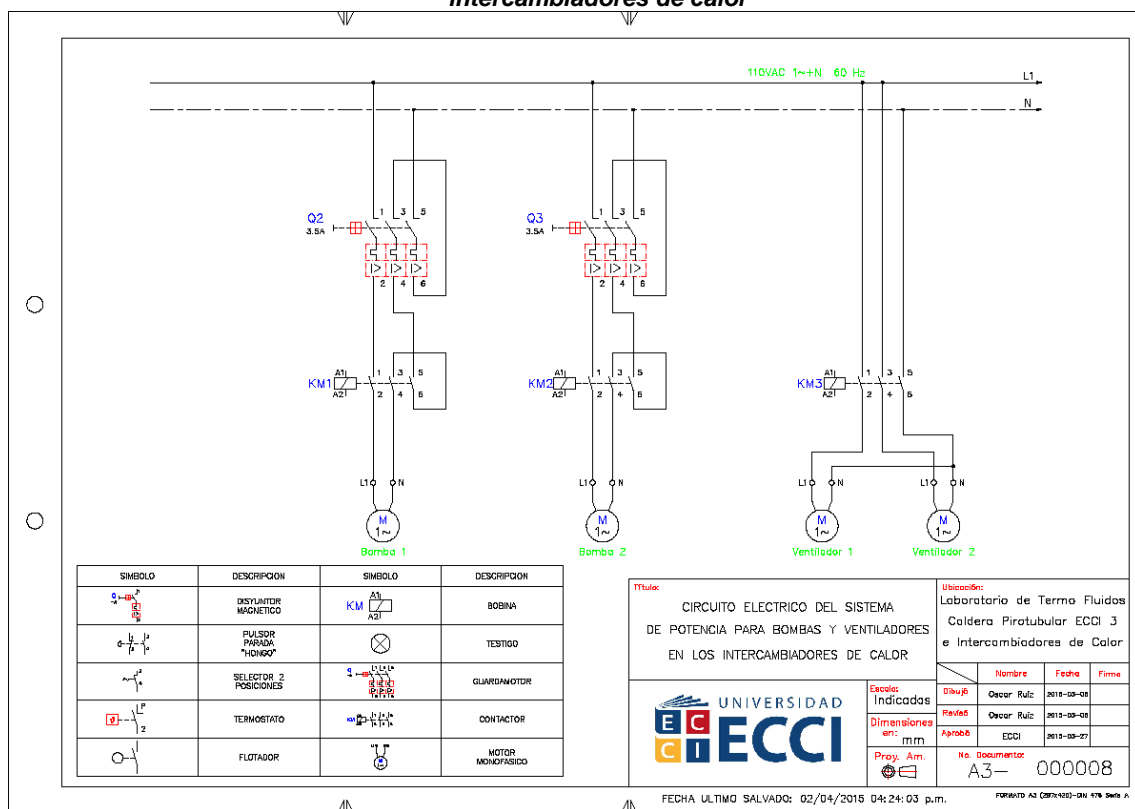
**Anexo 39. Coeficiente de dilatación K**

		DIÁMETROS					
		3/8"	1/2 "	3/4"	1 "	1 "1/4	1 "1/2
<b>Válvulas</b>	Esférica	1,3	1,4	1,5	1,8	2,1	2,2
	Angular	1,5	2,5	3,5	4,5	5,5	6,00
	Compuerta	0,08	0,09	0,1	0,15	0,15	0,3
<b>Codos</b>	Recto	0,25	0,3	0,5	0,6	0,9	1,2
	Gran radio	0,25	0,3	0,45	0,6	0,75	0,9
<b>Tramos en T</b>	Tramo recto	0,25	0,3	0,45	0,75	0,8	0,9
	Recto reducido	0,25	0,3	0,5	0,8	0,9	1,2
	Derivación	1,0	0,1	1,5	1,8	2,5	3,0
<b>Ensanchamiento</b>	de 1/4	0,25	0,3	0,5	0,7	0,9	1,2
	de 1/2	0,25	0,3	0,45	0,6	0,75	0,9
	de 3/4	0,08	0,09	0,15	0,15	0,25	0,3
<b>Contracción</b>	a 1/4	0,2	0,25	0,3	0,35	0,45	0,6
	a 1/2	0,1	0,15	0,25	0,3	0,35	0,45
	a 3/4	0,1	0,12	0,15	0,18	0,3	0,35

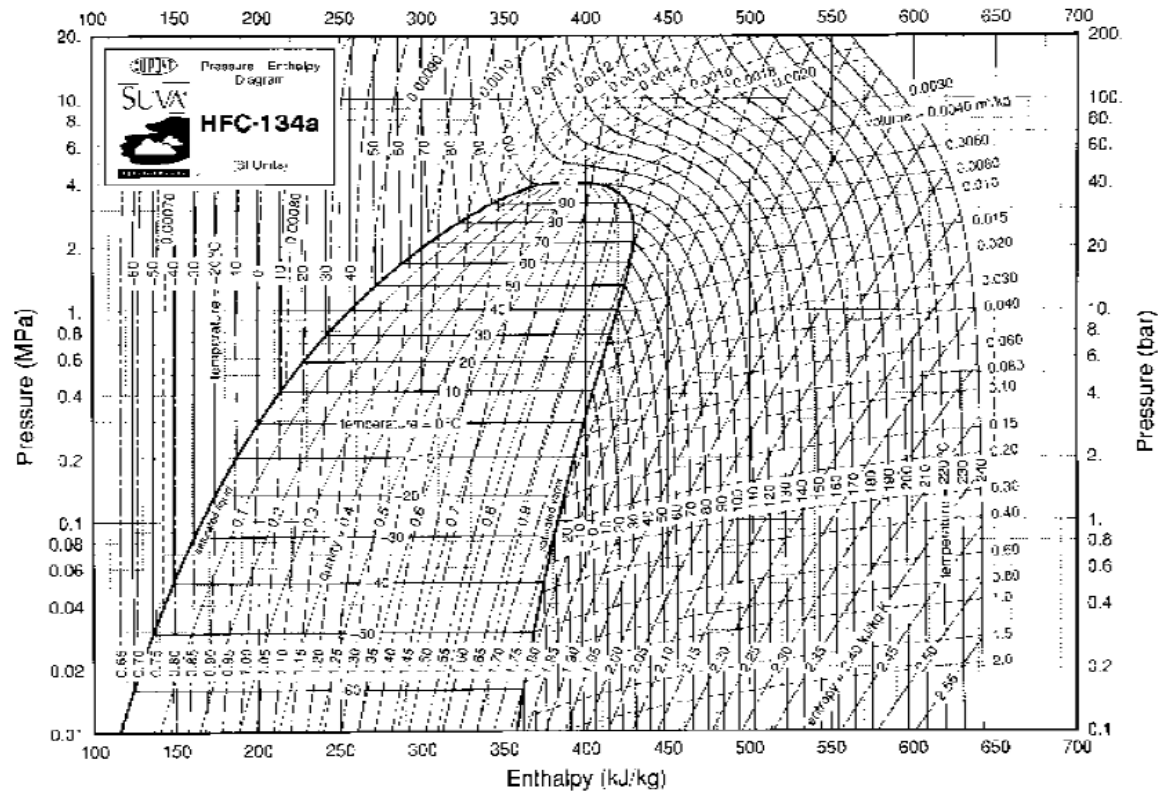
**Anexo 40. Circuito eléctrico de sistema de control para las bombas y ventiladores de los intercambiadores de calor**



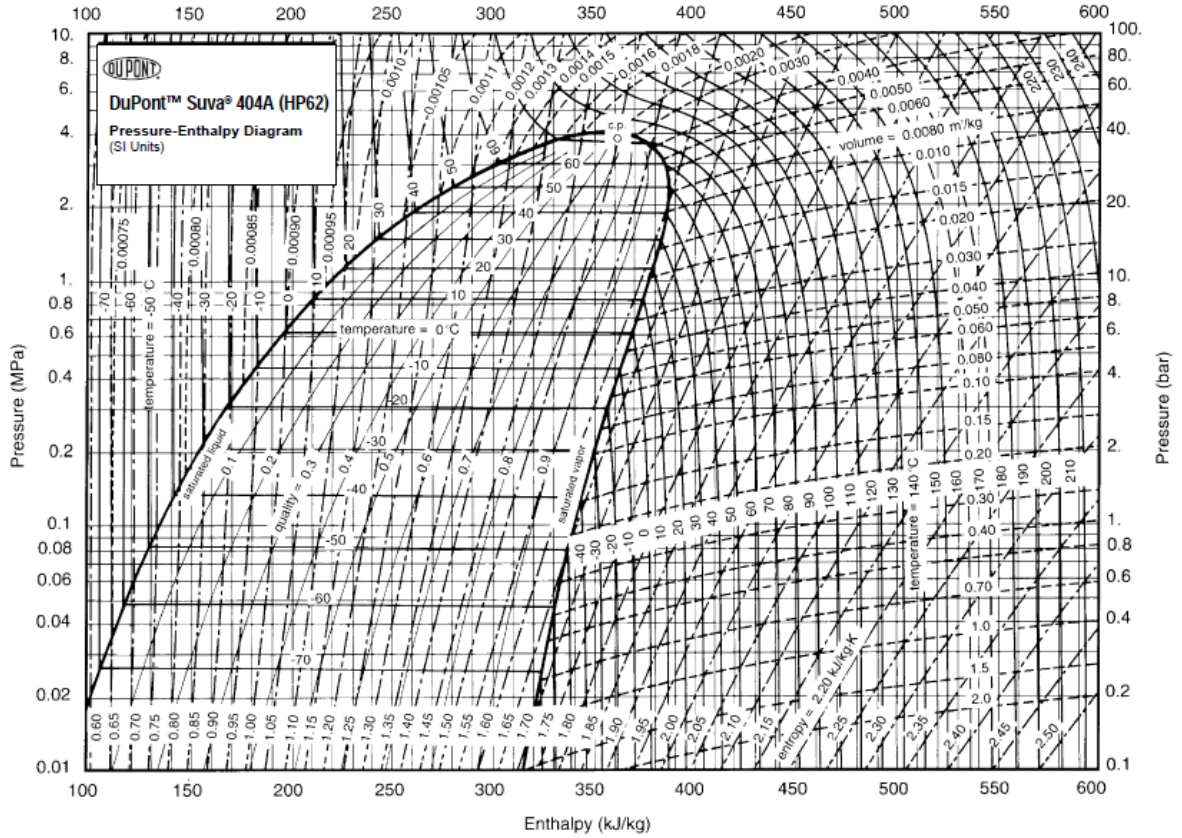
# **Anexo 41. Circuito eléctrico del sistema de potencia para bombas y ventiladores de los intercambiadores de calor**



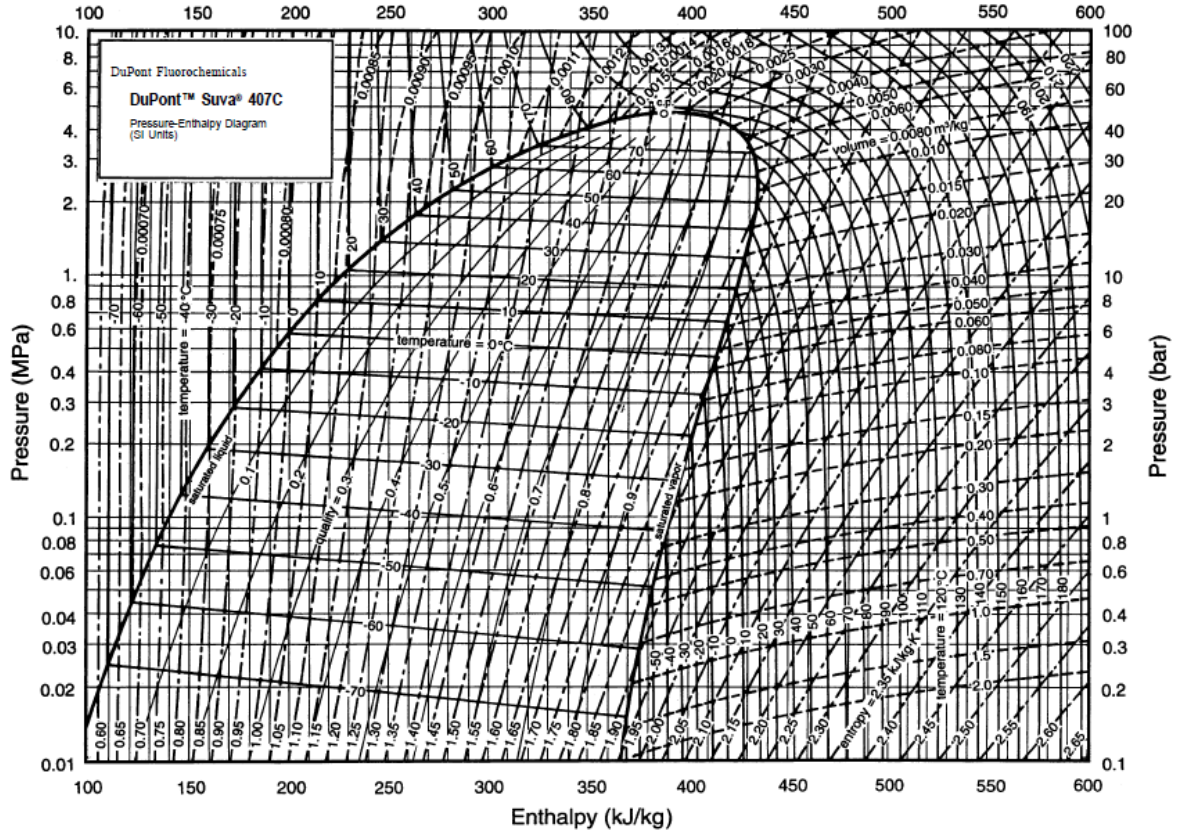
Anexo 42. Diagrama de Moore para refrigerante R-134a



**Anexo 43. Diagrama de Moore para refrigerante R-404A**



Anexo 44. Diagrama de Moore para refrigerante R-407C





### Anexo 45. Diagrama de Moore para refrigerante R-22

